

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

**Фізико-математичний факультет
Кафедра загальної фізики та фізики твердого тіла**

«На правах рукопису»

УДК 538.956

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Віталій КОТОВСЬКИЙ

(підпис)

(ім'я, прізвище)

“ ” 20__р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-науковою програмою
«Комп'ютерне моделювання фізичних процесів»
зі спеціальності 104 – «Фізика та астрономія»**

на тему: **«Електрофізичні властивості нематичного рідкого кристала
6СВ з домішками наночастинок твердого розчину
(Cu₆PS₅I)_{0.5}(Cu₇PS₆)_{0.5}»**

Виконала: студентка VI курсу, групи ОФ-81мн
(шифр групи)

Чирук Оксана Миколаївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник проф., д.т.н., Котовський Віталій Йосипович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Рецензент проф., д.ф.-м.н., Ковальчук Олександр Васильович

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з
праць інших авторів без
відповідних посилань.
Студент _____

(підпис)

Київ – 2020 року

АНОТАЦІЯ

ДО МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

СТУДЕНТА ФМФ, 2 КУРСУ МАГІСТЕРСЬКОГО РІВНЯ ГР. ОФ-81МН

Чирук Оксани Миколаївни

(ім'я та прізвище)

На тему «Електрофізичні властивості нематичного рідкого кристала 6СВ з домішками наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0.5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0.5}$

Науковий керівник доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри загальної фізики та фізики твердого тіла, Котовський Віталій Йосипович

(науковий ступінь, вчене звання, посада, ПІБ)

Актуальність теми: актуальність дослідження нематичних рідких кристалів полягає у збільшенні кількості розробки різноманітних пристроїв з їх використанням. Враховуючи світові тенденції бачимо, що рідкі кристали використовують переважно в дисплейних технологіях. Надзвичайно великий інтерес становлять рідкі кристали із введенням у них різного типу некристалічних речовин, найчастіше – наночастинок. Один із напрямків досліджень, щодо таких модифікацій стосується введення наночастинок не складної хімічної будови, одного типу. Аналогічним напрямком досліджень є вплив наночастинок суперіонних провідників. Їх особливістю є можливість створення твердих розчинів. В такому разі досить цікавим завданням, з точки зору фізики, є дослідження впливу наночастинок твердого розчину і порівняння отриманих даних з дією кожної компоненти твердого розчину окремо.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами кафедри: магістерське дослідження виконано в межах пріоритетних напрямків науково-дослідної роботи кафедри загальної фізики та фізики твердого тіла - "Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку

суспільства і держави". Тема даного дослідження відповідає «Переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року» згідно з постановою Кабінету Міністрів України.

Об'єкт дослідження: нематичний рідкий кристал з домішками наночастинок твердого розчину.

Предмет дослідження: вплив на електрофізичні властивості нематичного рідкого кристалу 6CB наночастинок твердого розчину суперіонних провідників $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$.

Мета роботи: мета даної роботи полягала виявленні впливу на нематичний рідкий кристал 6CB наночастинок твердого розчину суперіонних провідників $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ і порівнянні з даними по впливу на цей же рідкий кристал окремо наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ та наночастинок Cu_7PS_6 .

Методи дослідження: основним методом дослідження в даній роботі була діелектрична спектроскопія (визначення та аналіз частотних залежностей дійсної та уявної компонент комплексної діелектричної проникності). А саме, нами був використаний осцилоскопічний метод вимірювання. Також використовувався метод спостережень у поляризаційному мікроскопі.

Відомості про обсяг магістерської дисертації, кількість ілюстрацій, таблиць, додатків і літературних найменувань за переліком використаних джерел: обсяг – 90 сторінок: рисунків – 21, таблиць – 26, використаної літератури – 59.

Використані методи та отримані результати: У роботі були використані наступні методи та технології: технологія виготовлення наночастинок за рахунок подрібнення монокристалів твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ млином, метод оцінки розмірів наночастинок на основі аналізу фотографій отриманих при спостереженні у електронному мікроскопі (все це було

зроблено в Інституті експериментальної фізики Словацької академії наук у місті Кошіце), технологія змішування РК та отримання сумішей з необхідною концентрацією, технологія заповнення вимірювальної комірки рідким кристалом з наночастинками твердого розчину, метод оцінки орієнтації молекул у комірці за допомогою спостережень у поляризаційному мікроскопі та осцилоскопічний метод вимірювання компонент комплексної діелектричної проникності (все це було виконано магістром). На основі аналізу отриманих результатів показано, що вплив наночастинок твердого розчину є меншим, ніж дія кожної компоненти окремо. Зроблено припущення, що причиною такого ефекту може бути досить сильна взаємодія компонент твердого розчину ($\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ та Cu_7PS_6) між собою.

Перелік ключових слів: наночастинки, нематичний рідкий кристал, твердий розчин, діелектрична спектроскопія, компоненти комплексної діелектричної проникності.

SUMMARY
TO THE REPORT ON MASTER'S DISSERTATION
 FMF STUDENT, 2 MASTER'S LEVEL COURSE GR. OF-81MN

Chyruk Oksana
 (first and last name)

On the topic "Electrophysical Properties of Nematic Liquid Crystal 6CB with Impurity Nanoparticle Solids (Cu₆PS₅I)_{0.5} (Cu₇PS₆)_{0.5}

Scientific adviser Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of General Physics and Solid State Physics, Kotovsky Vitaliy Yosypovych

Relevance of the topic: the relevance of the nematic liquid crystals study is to increase the number of various devices development with their use. Considering the global trends, we can see that liquid crystals are used mainly in display technologies. Liquid crystals with the introduction of different types of non-crystalline substances, most often nanoparticles, are of great interest. One of the areas of research regarding such modifications concerns the introduction of nanoparticles of a complex chemical structure, of one type. A similar line of research is the influence of nanoparticles of superionic conductors. Their feature is the ability to create solid solutions. In this case, a rather interesting task, from the physics' point of view, is to study the effect of nanoparticles of a solid solution and to compare the obtained data with the action of each component of the solid solution separately.

The connection of the present research paper with the work of scientific programmes, curriculums, and topics of the department: the master's research is performed within the priority directions of research work of the general physics and solid state physics department - "Fundamental scientific researches on the most important problems of the development of scientific, technical, socio-economic, people potential to ensure Ukraine's competitiveness in the world and sustainable development of society and the state." The topic of this study corresponds to the "List

of priority thematic areas of scientific research and technological development for the period up to 2020" according to the resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine.

Object of study: a nematic liquid crystal with impurities of a solid nanoparticles solution.

Subject of study: influence on electrophysical properties of nematic liquid crystal 6CB nanoparticles of solid solution of superionic conductors $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0.5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0.5}$.

Purpose: The purpose of this work was to detect the effects on nematic liquid crystal of 6CB nanoparticles of superionic conductors $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0.5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0.5}$ nanoparticles and compared with the effects on the same liquid crystal of $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ nanoparticles and Cu_7PS_6 nanoparticles separately.

Research Methods: The main research method in this work was dielectric spectroscopy (determination and analysis of frequency dependences of the real and imaginary components of complex dielectric constant). Namely, an oscilloscopic method of measurement was used. The method of observation in the polarization microscope was also applied.

Information on the volume, the number of illustrations, tables, appendices and references by the list of sources used: the volume of the report - 90 pages: figures - 21, tables - 26, references – 59.

The methods used and the results obtained: The following methods and technologies were used in the work: manufacturing technology of nanoparticles due to grinding of monocrystals of solid solution $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0.5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0.5}$ mill, method of estimation of nanoparticle sizes based on photo analysis obtained by observation in an electron microscope (all these experiments were conducted at the Institute of Experimental Physics of the Slovak Academy of Sciences in Kosice), the technology of mixing LCD and obtaining mixtures with the required concentration, the technology of filling the measuring cell LCD with solid nanoparticles, a method of estimation of the of molecules in a cell orientation using polarizing microscope

observation and oscilloscope method for measuring complex permittivity components (all this was done masters). Based on the analysis of the results obtained, it is shown that the effect of the nanoparticles of the solid solution is less than the effect of each component separately. It has been suggested that a strong interaction of the solid solution components ($\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ and Cu_7PS_6) may be the cause of this effect.

Keywords list: *nanoparticles, nematic liquid crystal, solid solution, dielectric spectroscopy, components of complex dielectric constant.*

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**Фізико-математичний факультет
Кафедра загальної фізики та фізики твердого тіла**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський).

Спеціальність – 104 «фізика та астрономія (комп'ютерне моделювання фізичних процесів)».

Освітньо-наукова програма «Комп'ютерне моделювання фізичних процесів».

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис) Віталій КОТОВСЬКИЙ
(ім'я, прізвище)

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію

студенту _____
Чирук Оксані Миколаївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Електрофізичні властивості нематичного рідкого кристала 6CB з домішками наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ »,
науковий керівник дисертації Котовський Віталій Йосипович проф., д.т.н.,
затверджені наказом по університету від №891-с від 17.03.2020 _____

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження нематичний рідкий кристал з домішками наночастинок твердого розчину.

4. Предмет дослідження вплив на електрофізичні властивості нематичного

рідкого кристалу 6CB наночастинок твердого розчину суперіонних провідників $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

- Виготовити суміш рідкого кристала з різним вмістом наночастинок твердого розчину суперіонних провідників $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$.
- Дослідити вплив наночастинок твердого розчину на діелектричні властивості рідкого кристала 6CB.
- Порівняти отримані дані стосовно впливу наночастинок твердого розчину на рідкий кристал з дією наночастинок кожної компоненти твердого розчину $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ та Cu_7PS_6 окремо на цей же рідкий кристал.
- На основі аналізу отриманих результатів опублікувати тези та статтю.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

Рисунок 1.1 – Схематичне зображення мезофаз .

Рисунок 1.2 – Схема зміни орієнтації молекул в електричному полі від знаку діелектричної анізотропії.

Рисунок 1.3 – Види поляризації рідких кристалів.

Рисунок 2.1 – Залежність дійсної та уявної компонент комплексної діелектричної проникності від частоти планарно орієнтованих рідких кристалів 6CB без та з домішками наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ у нематичній фазі.

Рисунок 2.2 – Залежність дійсної компоненти ϵ' комплексної діелектричної проникності від частоти для планарно орієнтованих рідких кристалів 6CB без домішок та з домішками наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ у нематичній фазі.

Рисунок 2.3 – Залежність провідності планарно орієнтованих рідких кристалів у нематичній фазі.

Рисунок 2.4 – Залежність дійсної компоненти ϵ' комплексної діелектричної проникності від частоти у нематичній фазі для планарно орієнтованого рідкого кристала.

Рисунок 2.5 – Залежність уявної компоненти ϵ'' комплексної діелектричної проникності для планарно орієнтованого рідкого кристала у нематичній фазі.

Рисунок 2.6 – Залежності провідності планарно орієнтованого рідкого кристала 6CB у нематичній фазі від частоти з наночастинками Cu_7PS_6 за різних значень концентрації.

Рисунок 2.7 – Залежність провідності планарно орієнтованого 6CB у нематичній фазі від концентрації наночастинок Cu_7PS_6 при частоті 10^3 Гц.

Рисунок 3.1 – Схема вимірювальної комірки.

Рисунок. 3.2 – Планетарний кульовий млин PQ-N04.

Рисунок 3.3 – Фотографія наночастинок у електронному мікроскопі.

Рисунок 3.4 – Гістограма розподілу наночастинок по розмірах.

Рисунок 3.5 – Фото ультразвукового диспергатора УЗДН-М900Т.

Рисунок 3.6 – Електрична схема пристроїв для вимірювання ємності C та опору R діапазоні частот $10^{-2} - 10^6$ Гц.

Рисунок 3.7 – Частотні залежності дійсної компоненти комплексної діелектричної проникності ϵ' планарно орієнтованого рідкого кристала 6CB з домішками наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ за різних значень концентрацій.

Рисунок 3.8 – Частотні залежності уявної компоненти комплексної діелектричної проникності ϵ'' планарно орієнтованого рідкого кристала 6CB з домішками наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ за різних значень концентрацій.

Рисунок 3.9 – Частотні залежності дійсної компоненти комплексної діелектричної проникності ϵ' планарно орієнтованого рідкого кристала 6CB окремо з домішками наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$, Cu_7PS_6 та із домішками наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$.

Рисунок 3.10 – Частотні залежності уявної компоненти комплексної діелектричної проникності ϵ'' планарно орієнтованого рідкого кристалу 6CB з домішками наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$, Cu_7PS_6 та наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$.

Рисунок 3.11 – Концентраційна залежність провідності на змінному струмі σ для планарно орієнтованого рідкого кристала 6CB з домішками наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$, Cu_7PS_6 та наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0.5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0.5}$.

7. Орієнтовний перелік публікацій: Стаття на тему «Preparation and dielectrical properties of 6CB nematic liquid crystal with nanoparticles of $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0.5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0.5}$ superionic solid solution» до VIII International seminar «Properties of ferroelectric and superionic systems» Ужгород, 29-30 жовтня 2019 року. Тези на тему «How Liquid Crystals are Used in the XXI Century» до XX Міжнародної студентської науково-практичної конференції «Science and Technology of the XXI Century» Київ, 28 листопада 2019 року.

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

1. Дата видачі завдання 02.09.2019

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Проходження інструктажу з техніки безпеки та охорони праці.	02.09.2019 - 04.09.2019	Виконано
2	Ознайомлення з місцем роботи та засвоєння рекомендацій про виконання програми практики.	05.09.2019 - 06.09.2019	Виконано
3	Перегляд літературних джерел, складання огляду літератури.	09.09.2019 - 04.10.2019	Виконано
4	Пошук і добір фактичних матеріалів.	07.10.2019 - 01.11.2019	Виконано

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
5	Проведення експериментальних досліджень.	04.11.2019 - 29.11.2019	Виконано
6	Підготовка розділів на основі експериментальних даних	02.12.2019 - 27.12.2019	Виконано
7	Аналіз експериментальних результатів.	30.12.2019 - 31.01.2020	Виконано
8	Групування та систематизація матеріалів.	03.02.2020 – 28.02.2020	Виконано
9	Виконання індивідуального завдання. Підготовка звіту з практики.	02.03.2020 - 05.03.2020	Виконано
10	Складання заліку з науково-дослідної практики.	06.03.2020	Виконано
11	Аналіз отриманих результатів.	09.03.2020 - 13.03.2020	Виконано
12	Підготовка розділів магістерської дисертації на основі отриманих даних по темі магістерської дисертації.	16.03.2020 - 25.03.2020	Виконано
13	Оформлення розділів магістерської дисертації за вимогами.	26.03.2020 - 03.04.2020	Виконано
14	Надання роботи на перевірку науковому керівнику.	06.04.2020	Виконано
15	Виправлення зауважень керівника.	13.04.2020-17.04.2020	Виконано
16	Підготовка презентації та виступу для захисту.	20.04.2020-24.04.2020	Виконано
17	Подання анотації на сайт кафедри загальної фізики та фізики твердого тіла.	27.04.2020 -11.05.2020	Виконано
18	Надання роботи на перевірку науковому керівнику.	30.04.2020	Виконано
19	Перевірка магістерської дисертації на плагіат.	01.05.2020-06.05.2020	Виконано
20	Проведення попередньої доповіді перед науковим керівником.	08.05.2020	Виконано
21	Отримання відгуку від наукового керівника.	09.05.2020	Виконано

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
22	Подання магістерської дисертації на рецензію.	10.05.2020	Виконано
23	Здача магістерської дисертації на нормо-контроль (додержання вимог до оформлення).	12.05.2020	Виконано
24	Попередній захист магістерської дисертації.	13.05.2020	Виконано
25	Виправлення матеріалу магістерської дисертації згідно з зауваженнями комісії на попередньому захисті.	14.05.2020 - 15.05.2020	Виконано
26	Здача магістерської дисертації (друкований та електронний варіанти), Відгуку та Рецензії на кафедрі загальної фізики та фізики твердого тіла.	18.05.2020	Виконано
27	Надсилання матеріалів магістерської дисертації у бібліотеку КПІ ім. Ігоря Сікорського та сайт кафедри загальної фізики та фізики твердого тіла.	18.05.2020	Виконано
28	Остаточний захист магістерської дисертації.	22.05.2020	Виконано

Студент

(підпис)Оксана ЧИРУК
(ім'я, прізвище)

Науковий керівник

(підпис)Віталій КОТОВСЬКИЙ
(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Актуальність теми: актуальність дослідження нематичних рідких кристалів полягає у збільшенні кількості розробки різноманітних пристроїв з їх використанням. Враховуючи світові тенденції бачимо, що рідкі кристали використовують переважно в дисплейних технологіях. Надзвичайно великий інтерес становлять рідкі кристали із введенням у них різного типу твердих за даних умов речовин, найчастіше – наночастинок. Один із напрямків досліджень, щодо таких модифікацій стосується введення наночастинок не складної хімічної будови, одного типу. Аналогічним напрямком досліджень є вплив наночастинок суперіонних провідників, особливістю яких є можливість створення твердих розчинів. В такому разі досить цікавою з точки зору фізики задачею є дослідження впливу наночастинок твердого розчину і порівняння отриманих даних з дією кожної компоненти твердого розчину окремо.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами: магістерське дослідження виконано в межах пріоритетних напрямків науково-дослідної роботи кафедри загальної фізики та фізики твердого тіла - "Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави". Тема даного дослідження відповідає «Переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року» згідно з постановою Кабінету Міністрів України.

Мета дослідження: мета даної роботи полягала у виявленні впливу на нематичний рідкий кристал 6CB наночастинок твердого розчину суперіонних провідників $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ і порівнянні з даними по впливу на цей же рідкий кристал окремо наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ та наночастинок Cu_7PS_6 .

Задачі дослідження:

1. Виготовити суміш рідкого кристала з різним вмістом наночастинок твердого розчину суперіонних провідників $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0.5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0.5}$.
2. Дослідити вплив наночастинок твердого розчину на діелектричні властивості рідкого кристала 6CB.
3. Порівняти отримані дані стосовно впливу наночастинок твердого розчину на рідкий кристал з дією наночастинок кожної компоненти твердого розчину $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ чи Cu_7PS_6 окремо на цей же рідкий кристал.
4. На основі аналізу отриманих результатів опублікувати тези та статтю.

Об'єкт дослідження: нематичний рідкий кристал з домішками наночастинок твердого розчину.

Предмет дослідження: вплив на електрофізичні властивості нематичного рідкого кристалу 6CB наночастинок твердого розчину суперіонних провідників $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0.5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0.5}$.

Методи дослідження: основним методом дослідження в даній роботі була діелектрична спектроскопія (визначення та аналіз частотних залежностей дійсної та уявної компонент комплексної діелектричної проникності). А саме, нами був використаний осцилоскопічний метод вимірювання.

Наукова новизна одержаних результатів: вперше проведено дослідження та аналіз отриманих даних щодо впливу наночастинок твердого розчину суперіонного провідника $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0.5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0.5}$ на електрофізичні властивості рідкого кристала 6CB.

Практичне значення одержаних результатів: результати отримані в магістерській роботі є важливими для подальших досліджень рідких кристалів і розширенні меж їх застосування, а саме зміни властивостей рідкокристалічних матеріалів при введенні наночастинок.

Апробація результатів дисертації : результати досліджень оприлюднені у VIII International seminar «Properties of ferroelectric and

superionic systems» Ужгород, 29-30 жовтня 2019 року та у XX Міжнародній студентській науково-практичній конференції «Science and Technology of the XXI Century» Київ, 28 листопада 2019 року.

Публікації:

1. Стаття на тему «Preparation and dielectrical properties of 6CB nematic liquid crystal with nanoparticles of $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0.5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0.5}$ superionic solid solution» до VIII International seminar «Properties of ferroelectric and superionic systems» Ужгород, 29-30 жовтня 2019 року.

2. Тези на тему «How Liquid Crystals are Used in the XXI Century» до XX Міжнародної студентської науково-практичної конференції «Science and Technology of the XXI Century» Київ, 28 листопада 2019 року.

Ключові слова: *наночастинки, нематичний рідкий кристал, твердий розчин, діелектрична спектроскопія, компоненти комплексної діелектричної проникності.*

В роботі наведено: використаної літератури – 59, сторінок – 90, рисунків – 21, таблиць – 26.

ABSTRACT

Actuality of theme : the relevance of the nematic liquid crystals study is the increase of the number of various devices development with their use. Considering the global trends, we can observe that liquid crystals are used mainly in display technologies. Liquid crystals with the introduction of different types of non-crystalline substances, most often nanoparticles, are of great interest. One of the areas of research, regarding such modifications, concerns the introduction of nanoparticles of a complex chemical structure, of one type. A similar line of research is the influence of nanoparticles of superionic conductors. Their feature is the ability to create solid solutions. In this case, a rather interesting task, from the physics' point of view, is to study the effect of nanoparticles of a solid solution and to compare the obtained data with the action of the each component of the solid solution separately.

Relationship of the present work with scientific programs, plans, themes: the master's research is performed within the priority directions of the research work of the general physics and solid state physics department - "Fundamental scientific researches on the most important problems of the development of scientific, technical, socio-economic, people potential to ensure Ukraine's competitiveness in the world, and sustainable development of society and the state." The topic of this study corresponds to the "List of priority thematic areas of scientific research and technological development for the period up to 2020" according to the resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine.

Object of research: a nematic liquid crystal with impurities of a solid nanoparticles solution.

Subject of research: influence on electrophysical properties of nematic liquid crystal 6CB nanoparticles of solid solution of superionic conductors $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0.5}$ $(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0.5}$.

Objective of the work: The purpose of this work was to detect the effects on nematic liquid crystal of 6CB nanoparticles of superionic conductors

$(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0.5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0.5}$ nanoparticles and compared with the effects on the same liquid crystal of $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ nanoparticles and Cu_7PS_6 nanoparticles separately.

Research Methods: The following methods and technologies were used in the work: manufacturing technology of nanoparticles due to grinding of monocrystals of solid solution $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0.5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0.5}$ mill, method of estimation of nanoparticle sizes based on photo analysis obtained by observation in an electron microscope (all these experiments were conducted at the Institute of Experimental Physics of the Slovak Academy of Sciences in Kosice), the technology of mixing LCD and obtaining mixtures with the required concentration, the technology of filling the measuring cell LCD with solid nanoparticles, a method of estimation of the of molecules in a cell orientation using polarizing microscope observation and oscilloscope method for measuring complex permittivity components (all this was done masters). The main research method in this work was dielectric spectroscopy (determination and analysis of frequency dependences of the real and imaginary components of complex dielectric constant). Namely, an oscillographic method of measurement was used.

Tasks of research:

1. Make a mixture of liquid crystal with different content of nanoparticles of solid solution of superionic conductors $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0.5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0.5}$.
2. Investigate the effect of solid solution nanoparticles on the dielectric properties of a rare 6CB crystal.
3. Compare the obtained data on the effect of solid solution nanoparticles on the liquid crystal with the effect of nanoparticles of each component of the solid solution $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ and Cu_7PS_6 separately on the same liquid crystal.
4. Publish abstracts and scientific papers based on the analysis of the obtained results.

Scientific novelty of the results: For the first time, research and analysis of the obtained data on the effect of nanoparticles of solid solution of superionic conductor $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0.5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0.5}$ on the electrophysical properties of 6CB liquid crystal were performed.

The practical significance of the results: The results obtained in the master's thesis are important for further research of liquid crystals and the expansion of the limits of their application, namely changes in the properties of liquid crystalline materials with the introduction of nanoparticles.

Approbation of the dissertation results: The research results were published in the VIII International seminar "Properties of ferroelectric and superionic systems" Uzhhorod, October 29-30, 2019 and in the XX International Student Scientific and Practical Conference "Science and Technology of the XXI Century" Kyiv, November 28, 2019.

Publications:

1. Article on "Preparation and dielectric properties of 6CB nematic liquid crystal with nanoparticles of $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0.5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0.5}$ superionic solid solution" to the VIII International seminar "Properties of ferroelectric and superionic systems" Uzhhorod, October 29-30, 2019 .

2. Abstracts on "How Liquid Crystals are Used in the XXI Century" for the XX International Student Scientific and Practical Conference "Science and Technology of the XXI Century" Kyiv, November 28, 2019.

Keywords: nanoparticles, nematic liquid crystal, solid solution, dielectric spectroscopy, components of complex dielectric constant.

The article contains: used references – 59, pages: – 90, pictures – 21 tables–

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	16
ВСТУП	17
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РІДКІ КРИСТАЛИ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ	19
1.1 Історія відкриття рідких кристалів	19
1.2 Групи рідких кристалів	19
1.3 Типи термотропних рідких кристалів	20
1.4 Особливості структури	21
1.5 Параметр орієнтаційного порядку	22
1.6 Діелектрична анізотропія	22
ВИСНОВКИ ДО 1 РОЗДІЛУ	27
РОЗДІЛ 2 ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НЕМАТИЧНОГО РІДКОГО КРИСТАЛА ПРИ ВВЕДЕНІ НАНОЧАСТИНОК ОДНОГО ТИПУ	29
2.1 Вплив суперіонних наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ на діелектричні властивості рідкого кристалу 6CB	29
2.1.1 Опис експерименту	29
2.1.2 Вплив наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ на релаксаційні процеси та параметри приелектродного шару	30
2.1.3 Залежність часу релаксації τ від концентрації наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$	31
2.1.4 Вплив наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ на параметри об'ємної частини зразка	34
2.2 Вплив наночастинок Cu_7PS_6 на діелектричні властивості нематичного рідкого кристалу 6CB	39
2.1.1 Опис експерименту	40

2.1.2 Вплив наночастинок Cu_7PS_6 на релаксаційні процеси та параметри приелектродного шару	42
ВИСНОВКИ ДО 2 РОЗДІЛУ	48
РОЗДІЛ 3 ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НЕМАТИЧНОГО РІДКОГО КРИСТАЛА ПРИ ВВЕДЕНІ НАНОЧАСТНОК ТВЕРДОГО РОЗЧИНУ	50
3.1 Методика та метод дослідження	50
3.1.1 Будова вимірювальної комірки та технологія її заповнення	50
3.1.2 Технологія отримання та аналізу наночастинок	52
3.1.3. Технологія змішування РК та отримання сумішей з необхідною концентрацією наночастинок	55
3.1.4 Визначення залежності опору та ємності від частоти	57
3.2 Результати експерименту	61
3.3 Обробка експериментальних результатів.....	70
ВИСНОВКИ ДО 3 РОЗДІЛУ	82
ВИСНОВКИ	83
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	85

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ВАХ – вольт-амперна характеристика

ІТО – суміш оксидів індію та олова

НРК – нематичний рідкий кристал

РК – рідкий кристал

СРК – смектичний рідкий кристал

ХРК – холестеричний рідкий кристал

ВСТУП

Рідкокристалічним називають стан речовини, який володіє проміжними властивостями між твердим кристалом і рідиною. Рідким кристалом, як і твердим молекулярним кристалом властива як анізотропія, так і текучість, подібно до рідин [1]. Ці особливості дозволяють змінювати характеристики пристроїв на їх основі за допомогою впливу зовнішніх електромагнітних полів, що знайшло широке застосування в рідкокристалічних дисплеях.

Сьогодні рідкокристалічні (РК) технології займають більшу частину ринку дисплейних технологій. Поряд з широко поширеними LED (Light Emitted Diode - світлодіодний екран) екранами в останні роки розширюється сфера застосування РК технологій. Тому в значній кількості наукових лабораторій працюють над розширенням функціональних можливостей РК. З'являються нові пристрої відображення інформації. Наприклад, повністю прозорі [2], гнучкі [3], і dual-view(з подвійним оглядом) [4] РК дисплеї.

До того ж, РК технології знаходять й інші не дисплейні застосування. До них відносяться перебудовані мета матеріали [5], керовані фотонні кристали [6] і плазмонні структури [7], терагерцеві пристрої [8], сенсори [9], дифракційна [10] і адаптивна оптика [11], перелаштовуючі фільтри [12] і фотонні пристрої з контрольованою люмінесценцією [13,14]. Розробка і створення нових фотонних пристроїв вимагають проведення пошуку нових рідкокристалічних середовищ і композитів на їх основі.

У зв'язку з інтенсивним розвитком нанотехнологій в даний час одним з перспективних напрямків досліджень є зміна властивостей рідкокристалічних середовищ шляхом введення нанорозмірних та наноструктурованих об'єктів. Незважаючи на велику кількість експериментальних і теоретичних робіт [15], присвячених цим дослідженням, багато аспектів взаємодії РК з наночастинками і наноструктурованих поверхнями залишаються недослідженими. Також відомо, що розпочаті

дослідження щодо впливу наночастинок суперіонних провідників [16,17,18], особливістю яких є можливість створення твердих розчинів, різного типу компонент. Тому досить актуальною й цікавою, з точки зору фізики, задачею є дослідження впливу наночастинок твердого розчину і порівняння отриманих даних з дією кожної компоненти твердого розчину окремо.

РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РІДКІ КРИСТАЛИ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ

1.1 Історія відкриття рідких кристалів

Ще у 1888-му році австрійський ботанік Фридеріх Рейніцер з'ясував, що в деяких типах кристалів виявляється дві точки плавлення, через те що існує два різних рідкі стани, в одному з яких речовина прозора, а в іншому – мутна [19].

Хоча у 1904-му році німецький фізик Отто Леман представив ряд наукових доказів на користь рідких кристалів (РК) у своїй одноіменній книзі, все ж довгий час рідкі кристали не визнавали, як окремий стан речовини. У 1963-му році американський винахідник Джеймс Фергюсон знайшов застосування одній з властивостей РК – зміни кольору в залежності від температури [20]. Американець отримав патент на винахід, який може виявляти невидимі для ока теплові поля. Після цього популярність рідких кристалів різко зросла.

1.2 Групи рідких кристалів

Рідкі кристали зазвичай поділяють на дві групи:

Ліотропні - рідкі кристали, що представляють собою дво- або більше компонентні системи, утворюються в сумішах, що складаються з стержнеподібних молекул певної речовини і полярних розчинників. Наприклад, води. В цьому випадку різні фази виникають і залежності від концентрації речовини в розчиннику.

Термотропні рідкокристалічні фази утворюються внаслідок нагрівання речовини. Здатні існувати в умовах певної температури і тиску. Їх поділяють на три типи, в залежності від орієнтації молекул.

1.3 Типи термотропних рідких кристалів

Нематичні рідкі кристали (НРК). Інша назва – нематики. У рідкокристалічному стані всі молекули зберігають певну орієнтацію, вздовж виділеного напрямку, але можуть вздовж цього напрямку вільно переміщатися.

Нематики не володіють шаруватою структурою, а їх довгі осі молекул паралельні або майже паралельні між собою. Вони безперервно ковзають уздовж своєї довгої осі, при цьому обертаючись навколо них. Такі РК подібні до рідин. До цього агрегатного стану здатні прийти тільки ті речовини, молекули яких мають форму, при якій вони не відрізняються від свого дзеркального відображення відносно площини перпендикулярної до довгої осі.

Смектичні рідкі кристали (СРК). Інша назва – смектики. Для СРК як і нематиків властива просторова орієнтація молекул, але у них виникає вищого рівня впорядкованість. Молекули СРК розташовуються один відносно одного шарами. Шари СРК здатні переміщатися одна відносно одного. Щільність шару з наближенням до поверхні може змінюватися. Крім того, смектики мають відносно високу в'язкість ніж НРК.

Холестеричні рідкі кристали (ХРК). Інша назва – холостерики. Вони складаються з СРК молекул повернутих в сусідніх шарах на деякі кути. Багато в чому схожі з НРК, за винятком розташування молекул. Довгі осі молекул ХРК повернені один відносно одного таким чином, що молекули утворюють спіралі. Основна особливість такого типу рідких кристалів – його молекули надчутливі до будь-якої зміни температури і в залежності від неї – змінюють свою орієнтацію, а значить і крок спіралі. В залежності від кроку спіралі ХРК також змінюють свій колір коли величина кроку спіралі співвимірний з довжиною електромагнітної хвилі для видимого людським оком спектру. У зв'язку з двома зазначеними властивостями, такі рідкі кристали знайшли широке застосування в різних сферах людської діяльності.

1.4 Особливості структури

Основними факторами, що впливають на рідкі кристали, є енергія міжмолекулярної взаємодії W_m , що сприяє упорядкуванню їх структури, і теплова енергія, що призводить до руйнування дальнього порядку. Міжмолекулярна взаємодія визначається силами Ван-дер-Ваальса і залежить від хімічного складу і структури молекул. При підвищенні температури теплова енергія призводить до порушення порядку та при температурі просвітління РК з нематичної фази переходить в ізотропну рідину з хаотичним розташуванням молекул.

Схильністю до утворення рідкокристалічного стану мають молекули, які мають явно виражену протяжність уздовж одного з напрямків [21]. НРК мають дальній орієнтаційний порядок. Центри тяжіння молекул в НРК можуть вільно переміщатися, а молекули можуть обертатися щодо осей. ХРК так само мають орієнтаційний порядок, проте завдяки особливостям будови молекул утворюють закручену структуру.

Для СРК крім орієнтаційного порядку характерний одновимірний трансляційний порядок. З підвищенням температури смектична фаза переходить в нематичну фазу, а потім в ізотропну рідину. Схематичне зображення структури фаз рідких кристалів приводиться на рисунку 1.1.

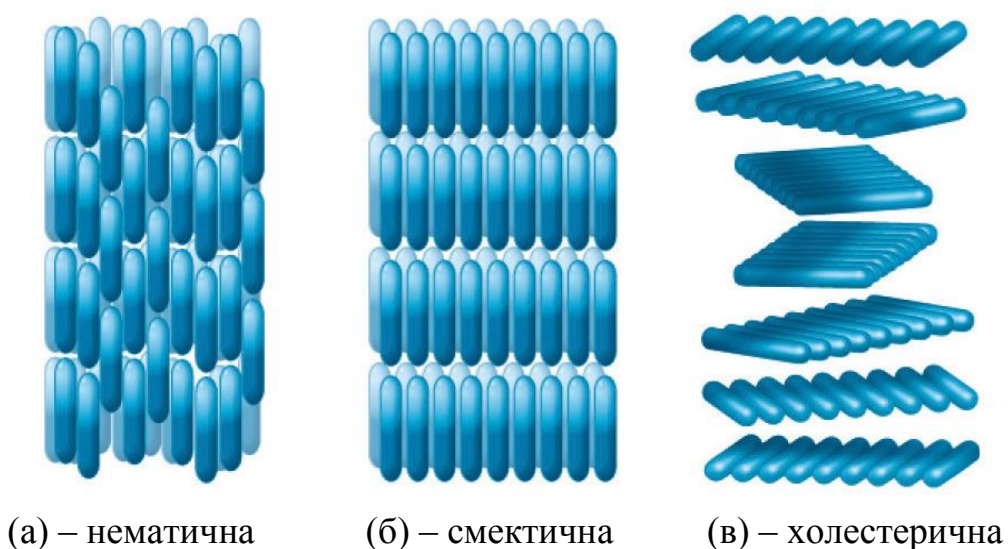


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення мезофаз [22]

1.5 Параметр орієнтаційного порядку

Напрямок орієнтації молекул в нематичній мезофазі характеризується одиничним вектором \mathbf{n} – директором. Молекули нематичних рідких кристалів можна розглядати як фізичні об'єкти стержнеподібної форми завдяки їх можливості вільно обертатись навколо своєї довгої осі. Кількісно ступінь впорядкованості таких одноосьових молекул рідкого кристала визначається скалярною величиною, яка називається параметром орієнтаційного порядку [23].

$$S_{op} = \frac{1}{2}(3\cos^2\varphi - 1), \quad (1.1)$$

де φ – кут між віссю індивідуальної молекули рідкого кристала і директора.

Директор, заданий в деякій просторовій точці, визначає переважний напрямок орієнтації молекулярних осей в околі цієї точки, а також задає власну локальну систему координат.

Ступінь впорядкованості для твердих кристалів $S_{op} = 1$, а для ізотропно-рідкої фази $S_{op} = 0$. У рідкому кристалі з паралельним розташуванням молекул $0 < S_{op} < 1$ і цей параметр повністю визначає анізотропію електричних і оптичних властивостей [23].

1.6 Діелектрична анізотропія

Діелектрична анізотропія РК визначається як різниця величин електричної проникності, паралельної ϵ_{\parallel} і перпендикулярної ϵ_{\perp} складовими напрямку директора. Величина і знак діелектричної анізотропії залежать від розподілу і анізотропії молекулярних диполів в РК мезофазі, а точніше від розподілу дипольних моментів полярних груп щодо довгих осей молекул,

тобто директора. Знак діелектричної анізотропії може бути позитивним або негативним.

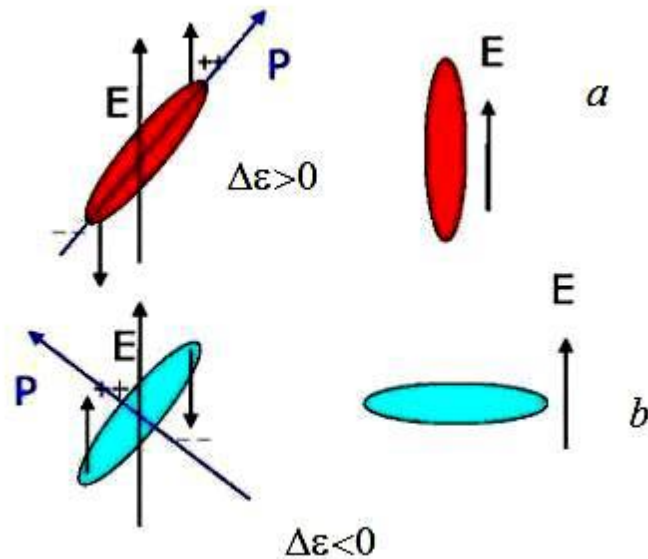
Для молекул з поздовжнім дипольним моментом величина $\Delta\epsilon$ позитивна. В області частот дебаївської релаксації диполів знак $\Delta\epsilon$ може змінитися. У стержнеподібних молекул рідкого кристала найбільше значення діелектричної проникності в оптичному спектральному діапазоні, як правило, забезпечується електронною поляризацією уздовж директора. Однак в низькочастотній області спектра, де істотний внесок від інших релаксаційних мод, діелектрична проникність уздовж директора може бути менше, ніж в перпендикулярному напрямку. В цьому випадку РК має негативну діелектричну анізотропію. Поведінка рідких кристалів в електричному полі залежить від знаку $\Delta\epsilon$. Індукована поляризація створює дипольний момент молекул, який в залежності від знака діелектричної анізотропії керує переорієнтацією паралельно (а) або перпендикулярно (б) напрямку поля (рисунок 1.2) [21].

При прикладанні електричного поля до шару РК відбувається зміна поляризації молекул, що призводить до переорієнтації директора n . Якщо РК має позитивну діелектричну анізотропію, тобто $\epsilon_{\parallel} > \epsilon_{\perp}$ директор матиме тенденцію орієнтуватися паралельно полю, прикладеному перпендикулярно шару РК і, навпаки, при негативній діелектричній анізотропії, коли $\epsilon_{\parallel} < \epsilon_{\perp}$ прикладання електричного поля призводить до орієнтації директора перпендикулярно до його напрямку [24]. Діелектрична проникність одноосної фази не залежить від азимутального кута і може бути виражена як:

$$\epsilon(\theta) = (\epsilon_{\perp}^2 \sin^2 \theta + \epsilon_{\parallel}^2 \cos^2 \theta)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.2)$$

де θ -полярний кут;

ϵ_{\perp} -перпендикулярна складова напрямку директора.



- (a) – при паралельній орієнтації щодо вектора електричного поля
 (b) – при перпендикулярній орієнтації щодо вектора електричного поля
 Рисунок 1.2 – Схема зміни орієнтації молекул в електричному полі від
 знаку діелектричної анізотропії [21]

Значення діелектричної анізотропії $\Delta\epsilon$ РК середовища відповідно до теорії Майєра-Мейєра визначається наступним виразом:

$$\Delta\epsilon = \frac{4\pi\rho}{M} N_a h F \left[\nabla\gamma^E - F \frac{\alpha^2}{2k_B T} (1 - \cos^2\zeta) \right] S \quad (1.3)$$

де ρ – густина;

M - молярна маса;

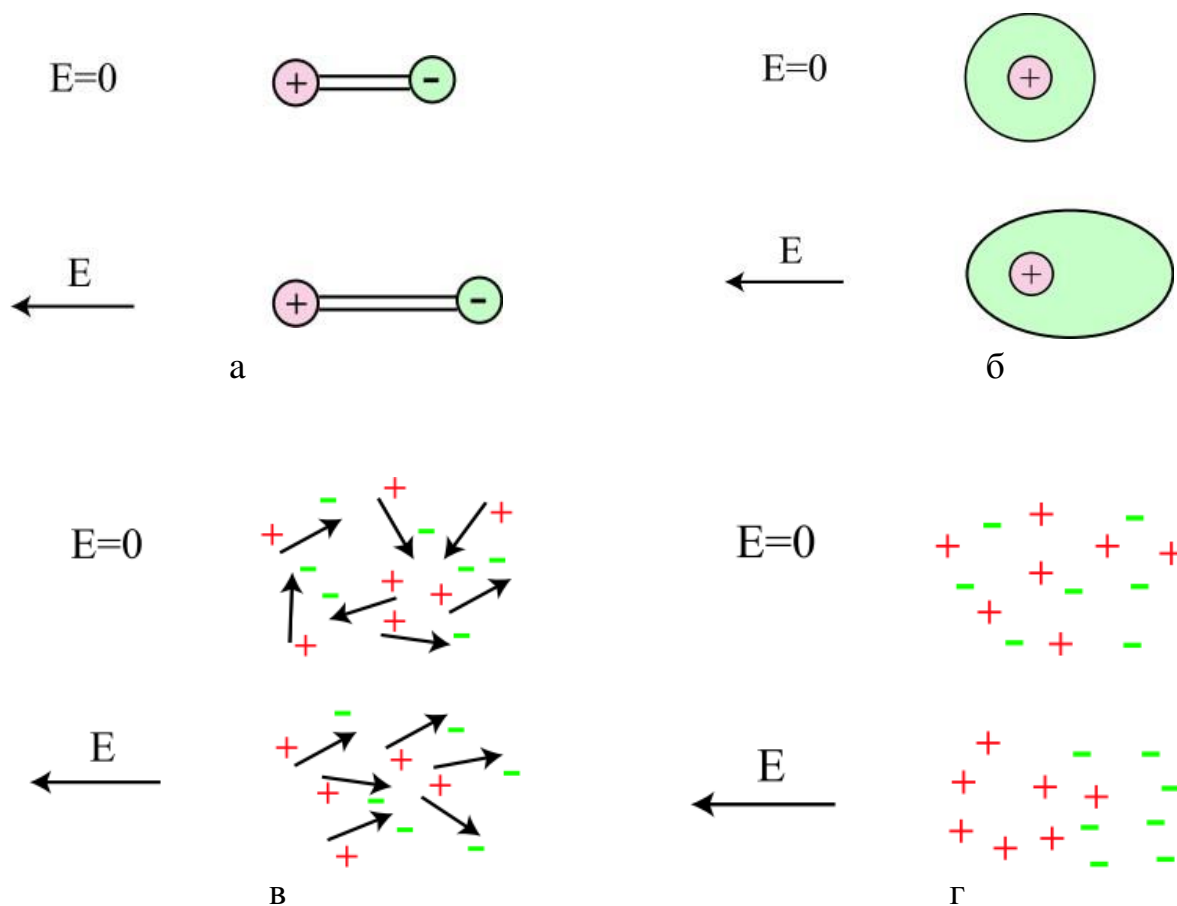
h і F - параметри внутрішнього поля;

γ^E – середня деформаційна поляризованість;

α - дипольних момент;

ζ - кут між точковим диполем з віссю максимальної поляризованості молекули [24].

Діелектричні властивості рідкого кристала визначаються поляризацією речовини, яка відповідає сумі електронної, атомної, орієнтаційної та іонно-релаксаційної поляризацій [25]. Електронна поляризація пов'язана зі зміщенням електронів щодо ядра в зовнішньому електричному полі (рисунок 1.3 а). Атомна поляризація викликана асиметричним поділом електронів (рисунок 1.3 б).



(а) - електронна поляризація, (б) - атомна поляризація, (в) - орієнтаційна поляризація, (г) - іонно-релаксаційна поляризація

Рисунок 1.3 – Види поляризації РК [14]

Орієнтаційна поляризація визначається орієнтацією диполів молекул у зовнішньому полі (рисунок 1.3 в). Іонно-поляризаційна обумовлена рухом мобільних іонів в РК матриці в зовнішньому електромагнітному полі (рисунок 1.3 г).

Діелектрична проникність НРК є комплексною величиною

$$\epsilon = \epsilon' - i\epsilon'', \quad (1.4)$$

де ϵ' - дійсна частина діелектричної проникності речовини, пропорційна зміні вільної енергії діелектрика, накопиченої за період коливання поля;

ϵ'' - уявна частина пропорційна енергії, що поглинається за період коливань поля.

ВИСНОВКИ ДО 1 РОЗДІЛУ

1. У даному розділі були розглянуті основні положення про рідкі кристали, а саме їх класифікацію, особливості структури, а також особливості діелектричних властивостей РК.

2. Проаналізувавши літературні джерела стосовно даної теми, зрозуміло, що РК унікальні матеріали, адже їх молекули певним чином упорядковані, що зумовлює анізотропію їх електричних, магнітних, оптичних, механічних властивостей. Вони поєднують у собі властивості не тільки ті, які притаманні рідинам і твердим тілам, а й проявляють специфічні ефекти.

3. Аналіз літературних джерел стосовно даної теми показав, що одним з перспективних напрямків досліджень РК є зміна їх властивостей шляхом введення наночастинок. Незважаючи на велику кількість експериментальних і теоретичних робіт, присвячених цим дослідженням, багато аспектів взаємодії РК з наночастинами і наноструктурованих поверхнями залишаються недослідженими. У більшості опублікованих робіт зміна властивостей РК розглядалися при введенні наночастинок одного типу, не складної хімічної будови.

3. Аналіз сучасного стану розвитку досліджень щодо впливу наночастинок на РК дає змогу сформулювати мету та завдання дипломної роботи. Метою є дослідження впливу наночастинок твердого розчину на діелектричні властивості РК в нематичній фазі та порівняння отриманих експериментальних даних з дією кожної компоненти твердого розчину окремо. Завдання, які потрібно виконати для реалізації поставленої мети:

- проаналізувати опубліковані роботи, щодо впливу наночастинок одного типу на діелектричні властивості РК;
- виготовити суміш нематичного рідкого кристала 6CB з різним вмістом наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$;

- визначити необхідні методи і технології для оцінки результатів та проведення вимірювань;
- дослідити діелектричні властивості виготовленого РК;
- обробити отримані експериментальні дані та порівняти їх;
- сформулювати висновки на основі аналізу отриманих результатів.

РОЗДІЛ 2 ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НЕМАТИЧНОГО РІДКОГО КРИСТАЛА ПРИ ВВЕДЕНІ НАНОЧАСТИНОК ОДНОГО ТИПУ

2.1 Вплив суперіонних наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ на діелектричні властивості рідкого кристалу 6CB

Один із перспективних методів для розширення функціональних можливостей РК є введення наночастинок. Серед таких наночастинок найбільш перспективними щодо модифікації функціональних можливостей РК є сегнетоелектричні наночастинок [26-32].

2.1.1 Опис експерименту

У таблиці нижче описані умови проведення експерименту при введенні наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$.

Таблиця 2.1 – Умови проведення експерименту при введенні наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ в нематичний рідкий кристал 6CB

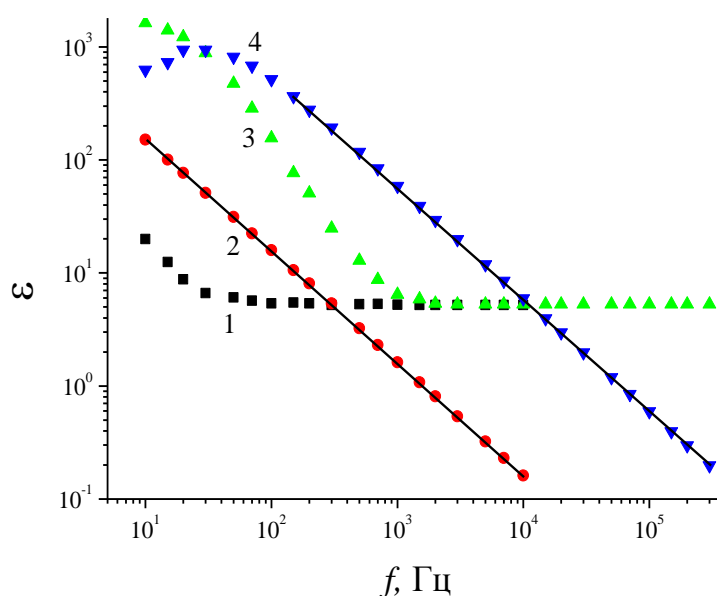
Підготовка до експерименту	
Концентрація наночастинок	0,01мг/мл, 0,05мг/мл, 0,1мг/мл
Форма наночастинок	Близька до сферичної
Середній розмір наночастинок	35 нм
Товщина зразків	10 мкм
Проведення дослідження	
Метод дослідження	осцилоскопічний
Тип мірювальної комірки	типу сендвіч
Температура	293 К
Діапазон частот	$10\text{-}10^6$ Гц
Форма вимірювального сигналу	синусоїдальна
Амплітуда сигналу	0,2 В

У роботі [17] та [33] було використано полярний НРК, що належить до сімейства ціанобіфенілів, 4-ціано-4-н-гексилбіфеніл (6CB) (BDH Limited

Poole England). Діапазон існування нематичної фази якого знаходиться в межах знаходиться від 14,5 до 29°C.

2.1.2 Вплив наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ на релаксаційні процеси та параметри приелектродного шару

На рисунку 2.1 показана залежність ϵ' (1,3) та ϵ'' (2,4) від частоти для планарно орієнтованих РК 6CB (крива 1 та 2) і 6CB з концентрацією наночастинок 0,01 мг/мл $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ (крива 3 та 4).



(1, 3) – дійсна компонента ϵ'

(2, 4) – уявна компонента ϵ''

(1,2) – 6CB без наночастинок

(3,4) – 6CB та 0,01мг/мл $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$

Рисунок 2.1 – Залежність дійсної та уявної компонент комплексної діелектричної проникності від частоти планарно орієнтованих РК 6CB без та з домішками наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ у нематичній фазі [17]

Проаналізувавши графік бачимо:

- 1) на ділянці частот $f < 10$ Гц для чистого 6CB спостерігається дисперсія дійсної компоненти ϵ' ;

- 2) на ділянці частот $f < 10^3$ Гц для РК 6CB+0,01 мг/мл $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ спостерігається дисперсія дійсної компоненти ϵ' .

У роботі [17] для аналізу дисперсії діелектричної проникності були побудовані діаграми Коул-Коула, апроксимували їх півколом (з малою похибкою) та визначили, що отримана дисперсія діелектричної проникності відповідає дисперсії Дебая за теорією релаксаційних процесів [34], і описується співвідношенням (2.1).

$$\epsilon^* = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_\infty}{1 + i\omega\tau} \quad (2.1)$$

де ϵ^* - комплексна діелектрична проникність;

ϵ_0 та ϵ_∞ діелектричні проникності відповідно для частот $f=0$ та $f=\infty$;

τ – час релаксації.

2.1.3 Залежність часу релаксації τ від концентрації наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$

Релаксаційний процес, який спостерігається при $f < 10^3$ Гц, можна пояснити на основі двошарової Максвелл-Вагнерівської поляризації [34]. В такому разі одним із шарів є приелектродна ділянка, у якій для даного діапазону частот перенос заряду відбувається за рахунок коливань диполів молекул РК в межах кутів, що відповідають флуктуаціям параметра порядку. Другим шаром є об'ємна частина зразка де перенос заряду відбувається за рахунок переносу іонів.

В таблиці 2.1.наведені дані щодо залежності часу релаксації τ від концентрації наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$.

Таблиця 2.2 – Залежність параметрів приелектродних шарів та об'ємної частини гомогенного РК 6CB від концентрації наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ [17]

Зразок	τ , мс	l , нм	$\sigma_{v1}, \text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$	$\sigma_{v2}, \text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$
6CB				$9,0 \cdot 10^{-8}$
6CB+0,01 мг/мл наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$	5,6	13,5		$3,3 \cdot 10^{-6}$
6CB+0,05 мг/мл наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$	8,9	10,8	$2,5 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^{-8}$
6CB+0,1 мг/мл наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$	6,7	10,6	$3,5 \cdot 10^{-8}$	$4,8 \cdot 10^{-8}$

Найбільші зміни сумарної поляризації у приелектродній ділянці (найбільший електричний струм, який буде при цьому протікати) буде у випадку :

- 1) планарної орієнтації молекул РК з $\Delta\epsilon > 0$ (саме така умова виконується для досліджуваних у цих роботах зразків),
- 2) у випадку гомеотропної орієнтації для РК з $\Delta\epsilon < 0$.

Те що низькочастотний релаксаційний процес зумовлений саме приелектродними процесами підтверджується досить значними величинами діелектричних проникностей ϵ' (як впливає з рисунка 2.1 при $f=10$ Гц $\epsilon' > 10^3$). Такі великі величини діелектричних проникностей зумовлені саме нерівномірним розподілом електричного поля і їх можна розглядати як ефективні величини [17].

Розглянутий вище релаксаційний процес пов'язаний з приелектродними процесами не можна розглядати як суто електродну поляризацію, адже для досліджуваних РК з $\Delta\epsilon > 0$ він виникає тільки при планарній орієнтації молекул та він передує більш низькочастотному процесу пов'язаному саме з електродною поляризацією. Враховуючи електродну поляризацію, приелектродний низькочастотний релаксаційний

процес для досліджуваних зразків буде описуватись співвідношенням (2.2) [35]

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + i\omega\tau} + \frac{\varepsilon_{se} - \varepsilon_\infty}{1 + (i\omega\tau_e)^{1-\alpha}}, \quad (2.2)$$

де ε_∞ - величина діелектричної проникності при $f=\infty$;

ε_{se} - величина діелектричної проникності при $f=0$;

τ_e – час релаксації (все для електродної поляризації) ;

α - параметр Коул-Коула.

Оцінки проведені для досліджуваних зразків на основі роботи [35] показують, що величина τ_e повинна складати одиниці секунд. Тобто основні зміни в діелектричному спектрі зумовлені електродними процесами повинні спостерігатись при частотах порядку 10^{-3} - 10^{-1} Гц, що на два порядки нижче найменшої частоти при проведенні даного дослідження.

Відповідно до теорії Максвел-Вагнерівської поляризації величина τ повинна бути обернено пропорційною до електропровідності РК. Тому саме особливості електропровідності рідкого кристалу 6CB із $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ наночастинками можуть бути визначальним фактором немонотонної залежності величини τ від вмісту наночастинок.

Ще одним із параметрів, який можна оцінити із аналізу релаксаційних процесів є товщина приелектродного шару l де перенос заряду в основному відбувається за рахунок коливань диполів молекул. Для оцінки величини l було використане співвідношення (2.3)

$$l = \frac{d}{2} \frac{\varepsilon_V}{\varepsilon_S}, \quad (2.3)$$

де d – товщина РК;

ϵ_v - величина діелектричної проникності об'єму РК;

ϵ_s - величина діелектричної проникності при $f=0$.

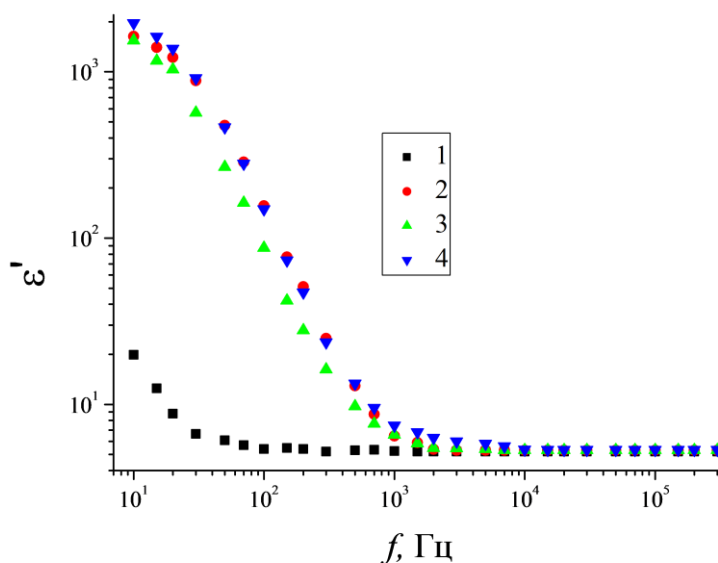
Величини l для різних концентрацій $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ наночастинок наведено в таблиці 2.1. Проаналізувавши наведені експериментальні дані зрозуміло, що збільшення концентрації наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ у РК призводить до невеликого зменшення величини l .

2.1.4 Вплив наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ на параметри об'ємної частини зразка

На рисунку 2.2 показана залежність ϵ' (дійсної компоненти) від частоти для планарно орієнтованого РК: крива 1 – (без домішок 6СВ), крива 2 – (6СВ з домішками наночастинок 0,01 мг./мл $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$), крива 3 – (6СВ з домішками наночастинок 0,05 мг/мл $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$) та крива 4 – (6СВ з домішками наночастинок 0,1 мг/мл наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$).

Із даних результатів випливає, що при введенні вуглецевих нанотрубок у РК спостерігаються зміни діелектричного спектру при частотах $f < 10^3$ Гц. Ці різкі зміни діелектричного спектру були спричинені приелектронними ефектами. Важливо відмітити, що на відміну від даних для 6СНВТ рідкого кристалу концентраційна залежність величини дійсної компоненти ϵ' наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ при значеннях частоти на проміжку $f < 10^3$ Гц є монотонною функцією [16,17].

Як впливає із рисунка 2.2, для $f > 10^4$ Гц, дійсна компонента комплексної діелектричної проникності не залежить від частоти. Величина ϵ' на ділянці частот $f > 10^4$ Гц відповідає її величині об'ємної частини зразка ϵ'_v . Знайшовши різницю між значеннями величин ϵ'_v для зразків 6СВ+0,1 мг/мл наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ й чистим 6СВ, побачили, що вона незначна.



- (1) – чистий 6CB; (2) – 6CB та 0,01 мг/мл $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$;
 (3) – 6CB та 0,05 мг/мл $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$; (4) – 6CB та 0,1 мг/мл $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$.

Рисунок 2.2 – Залежність дійсної компоненти ϵ' комплексної діелектричної проникності від частоти для планарно орієнтованих РК 6CB без домішок та з домішками наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ у нематичній фазі [17]

Отже, введення наночастинок призводить до не великого збільшення діелектричної проникності, що може бути зумовлене наступними причинами:

зміною орієнтації РК;

порівняно не великою діелектричною проникністю наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ порівняно з діелектричною проникністю РК;

частковою агрегацією домішок і частковим їх осадженням на поверхні електродів [17].

Найкраща діелектрична проникність композитних матеріалів (саме до таких матеріалів можна віднести досліджувані зразки) описується теорією Максвелла-Гарнетта [36]. В даній теорії розглядається матриця з діелектричною проникністю ϵ'_m у якій рівномірно розподілені сферичні включення з діелектричною проникністю ϵ'_d . Оскільки наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$, як було відмічено вище, мають сферичну форму, то така модель досить добре повинна описувати досліджувані зразки.

Відповідно до теорії Максвелла-Гарнетта діелектричну проникність композиту ε'_{ef} можна оцінити із співвідношення.

$$\frac{\varepsilon'_{ef} - \varepsilon'_m}{\varepsilon'_{ef} + 2\varepsilon'_m} = \sigma_d \frac{\varepsilon'_d - \varepsilon'_m}{\varepsilon'_d + 2\varepsilon'_m}, \quad (2.4)$$

де δ_d – концентрація наночастинок.

Як впливає із співвідношення (2.4), при невеликій концентрації наночастинок (а саме такі концентрації наночастинок були в роботі [17]) значної зміни діелектричної проникності РК при введенні наночастинок можна досягти коли діелектрична проникність наночастинок на 2-3 порядки перевищує величину діелектричної проникності рідкого кристалу. Оскільки зміна величини ε' при введенні наночастинок була малою, то можна припустити, що діелектрична проникність наночастинок не набагато перевищує діелектричну проникність 6СВ.

Було досліджено зразки з планарною орієнтацією молекул РК. У випадку 6СВ з позитивною величиною анізотропії діелектричної проникності це відповідає найменшій із можливих значень величині діелектричної проникності. Якби введені у РК наночастинки $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ впливали на орієнтацію молекул (особливо у випадку тих наночастинок, які адсорбувались на поверхні електродів), то це повинно було привести до значно більших змін величини ε' ніж було отримано. Тому було зроблено припущення, що введені наночастинки не суттєво впливали на орієнтацію молекул РК навіть при самих великих концентраціях. Підтвердженням такого припущення є сферична форма наночастинок. Суттєвого впливу на орієнтацію молекул РК слід було чекати при еліптичній формі наночастинок.

Як впливає із даних наведених на рисунку 2.1 та 2.2 для частот де величина ε' не залежала від частоти величина ε'' лінійно зменшувалась з ростом частоти (величина опору від частоти не залежала). Саме на таких

ділянках частотних залежностей ε'' визначалась величина провідності за співвідношенням (2.5)

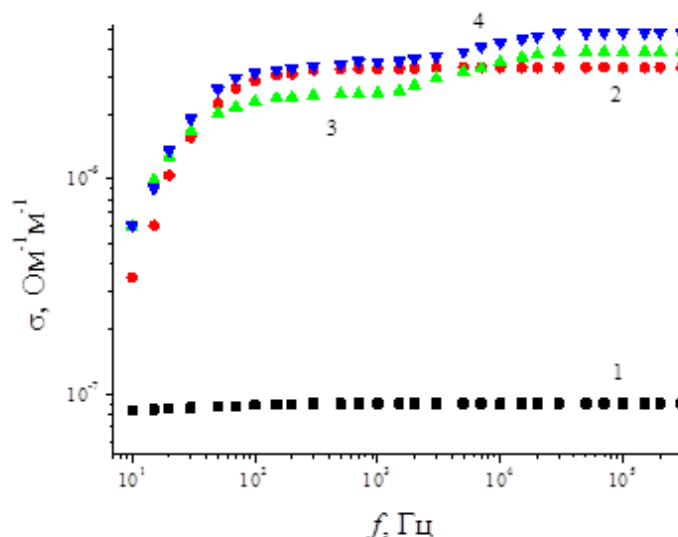
$$\sigma_{AC} = \varepsilon_0 \varepsilon'' \omega \quad (2.5)$$

де ε_0 – електрична стала;

$\omega = 2\pi f$ – циклічна частота.

На рисунку 2.3 наведені залежності провідності планарно орієнтованих РК від частоти, у нематичній фазі: на першій кривій – чистий 6СВ, на другій – 6СВ з домішками наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ концентрацією 0,01 мг./мл, на третій – 6СВ з домішками наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ концентрацією 0,05 мг/мл та на четвертій – 6СВ з наночастиноками $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ 0,1 мг/мл. З рисунку бачимо, що при малих частотах провідність є величиною залежною від частоти. Вона зумовлена впливом приелектродних процесів. Для цієї ділянки частот не можна використовувати поняття провідності оскільки електричне поле є неоднорідним і в основному прикладене до приелектродної ділянки [37]. Частотну залежність провідності на цій ділянці не можна описати степеневою функцією наведеною в [38,39].

На рисунку 2.3 чітко видно, що починаючи з $f > 5 \cdot 10^4$ Гц провідність для всіх зразків є величиною не залежною від частоти. Провідність в цьому діапазоні дорівнює провідності об'єму зразка. Між залежностями провідності для зразків РК чистого 6СВ й 6СВ з домішкою наночастинок 0,01 мг./мл $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ та для зразків 6СВ з домішкою наночастинок 0,05 мг/мл $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ й 6СВ наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ 0,1 мг/мл існує суттєва відмінність [37]. У першому випадку, для частот менших за $5 \cdot 10^4$ Гц, спостерігається для залежності провідності від частоти тільки одна “поличка”, а для 2 випадку таких “поличок” – дві.



(1) – 6CB

(2) – 6CB та 0,01 мг./мл $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$

(3) – 6CB та 0,05 мг/мл $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$

(4) – 6CB та 0,1 мг/мл $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$

Рисунок 2.3 – Залежність провідності планарно орієнтованих РК у нематичній фазі [17]

Для частот, де провідність не залежить від частоти, вона відповідає провідності об'єму, тому у дослідженні [37] припускають, що для зразків РК 6CB+0,05 мг/мл наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ та 6CB+0,1 мг/мл наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ їх провідність відповідає мінімум двома різним системами заряду.

У таблиці 2.2 наведено значення величин провідності об'єму зразків. Для другого випадку, описаного на попередній сторінці, для зразків РК з домішками наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$, концентраціями 0,05 мг/мл та 0,1 мг/мл характерні дві величини провідності об'єму зразків. На графіку залежності провідності від частоти, ці дві величини й відповідають двом “поличкам”. Величина σ_{v1} відповідає першій в бік росту частоти “поличці” σ на частотній залежності провідності від частоти, а величина σ_{v2} – другій “поличці”. Для тих зразків де спостерігалась лише одна “поличка” величина провідності була занесена в графу σ_{v2} .

2.2 Вплив наночастинок Cu_7PS_6 на діелектричні властивості нематичного рідкого кристалу 6CB

Значно розширити функціональні властивості РК можуть також наночастинок суперіонних провідників зі структурою аргіродиту. Дослідження суперіонних провідників зі структурою аргіродиту показали, що вони мають високу електричну провідність, а також сегнетоеластичні та нелінійні оптичні властивості [40,41]. Тому очевидно, що такі властивості будуть притаманні також наночастинок.

При введенні наночастинок суперіонного провідника $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ збільшується провідність нематичного рідкого кристала 6CHBT [16]. Проте для порівняно невеликого інтервалу зміни концентрації наночастинок (0,01–0,1 мг/мл) було знайдено, що концентраційна залежність провідності є немонотонною функцією. Щоб перевірити, чи подібний ефект буде спостерігатись і у інших, ніж в 6CHBT, рідких кристалах, було проведено подібні дослідження з рідким кристалом 6CB у роботі [18]. Основна відмінність 6CB рідкого кристала порівняно з 6CHBT рідким кристалом полягає у величині дипольного моменту. Як випливає з табличних даних, величина дипольного моменту молекул 6CB більша від такої ж величини для молекул 6CHBT.

Зміна рідкого кристала з 6CHBT на 6CB призводить до значно більшого впливу наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ на величину електропровідності [17]. Проте із забарвлення рідкого кристала на зелений колір при введенні наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ в 6CB рідкий кристал було зроблено висновок, що в більш полярному, ніж 6CHBT, рідкому кристалі 6CB відбувається дисоціація частини молекул $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$. Саме іони міді, як і у розчині мідного купоросу, були основною причиною забарвлення рідкого кристала.

Для того щоб перевірити, наскільки тип рідкого кристала впливає на концентраційну залежність провідності при введенні наночастинок, логічно було провести дослідження з іншими, ніж $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$, наночастинок. Для

досліджень було використано Cu_7PS_6 наночастинки. За результатами досліджень монокристалів Cu_7PS_6 було показано, що енергія зв'язку атомів міді у Cu_7PS_6 є значно більшою, ніж у $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ молекулах, що давало підстави уникнути дисоціації молекул Cu_7PS_6 у рідкому кристалі [18].

Тому метою такої роботи [18] було дослідження впливу наночастинок Cu_7PS_6 на діелектричні властивості нематичного РК 6CB, а також порівняння їх з аналогічними результатами по впливу на 6CB наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$.

2.1.1 Опис експерименту

У даному дослідженні [18] аналогічно використовували полярний нематичний рідкий кристал, що належить до сімейства ціанобіфенілів, а саме 4-ціано-4-н-гексилбіфеніл (6CB) (BDH Limited Poole England). Діапазон існування нематичної фази у цьому РК знаходиться в межах від 14,5 до 29 °C.

План підготовки до дослідження [18]:

синтез сполук Cu_7PS_6 проводили на основі Cu, S і P (підбирали відповідно до стехіометрії) та поміщали в відкачану ампулу з кварцового скла ;

ампулу нагрівали зі швидкістю 50 K/год до температури 673 ± 5 K (витримували протягом 24 годин).;

температуру підвищували до значення 973 ± 5 K (витримували при цій температурі протягом 3 днів);

зону плавлення нагрівали до температури 1380 ± 5 K, яка на 50 K була вища температури плавлення. Відпал утворених порошків здійснювали протягом 48 год;

порошки Cu_7PS_6 розмелювали кульовим млином (Fritsch Pulverisette 6). 2 г порошку перемелювали у флаконі з нержавіючої сталі об'ємом 80 мл, використовуючи чотири кульки з нержавіючої сталі діаметром 20 мм у кожному циклі. Швидкість обертання становила 400 об/хв, а атмосфера

фрезерування складала 2 ГПа. Максимальний час розмелювання порошку становив 30 хв ;

заповнення зразків рідким кристалом без та з наночастинками відбувалось за допомогою капілярного методу при температурі на 5–10 К вище температури фазового переходу від нематичної до ізотропної фаз [18].

Аналогічно, до проведено експерименту при введені наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$, у роботі [18, 42] обчислювали опір R та ємність C зразків за частотою. На основі отриманих величин опору, ємності, геометричних розмірів комірки визначали компоненти комплексної діелектричної провідності.

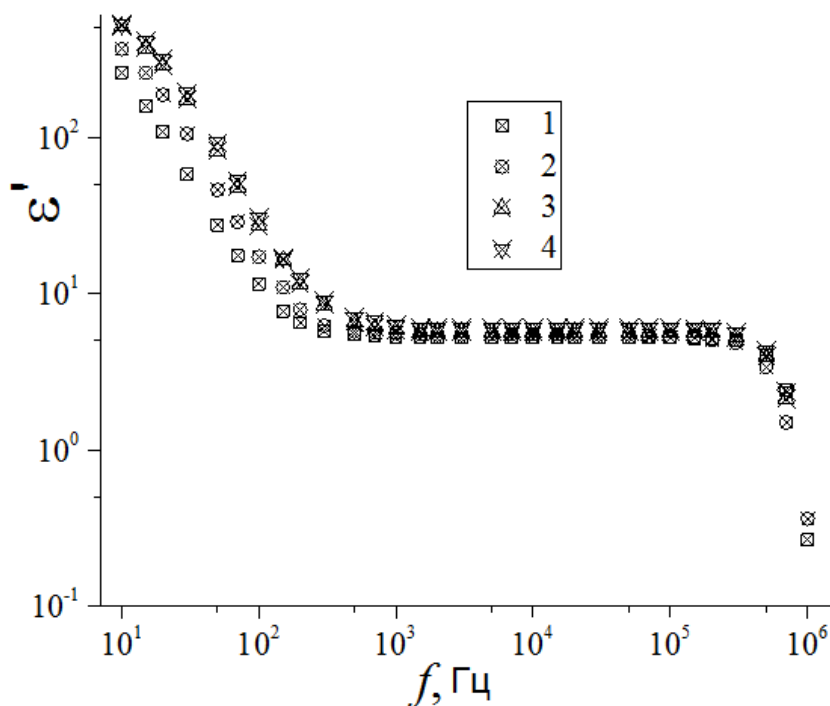
Нижче у таблиці 2.3 описані умови для підготовки та проведення дослідження.

Таблиця 2.3 – Умови проведення експерименту при введені наночастинок Cu_7PS_6 в нематичний рідкий кристал 6CB[18]

Підготовка до експерименту	
Концентрація наночастинок	0,01 мас.%, 0,05 мас.%, 0,1 мас.%
Форма наночастинок	Близька до сферичної
Середній розмір наночастинок	117 нм
Товщина зразків	10 мкм
Проведення дослідження	
Метод дослідження	Осцилоскопічний
Температура	293 К
Діапазон частот	$10\text{--}10^6$ Гц
Форма вимірювального сигналу	Синусоїдальна
Амплітуда сигналу	0,2 В

2.1.2 Вплив наночастинок Cu_7PS_6 на релаксаційні процеси та параметри приелектродного шару

На рисунку 2.4 показано залежності ϵ' планарно орієнтованого рідкого кристала 6CB (1) та 6CB з домішкою наночастинок Cu_7PS_6 взятих за концентраціями 0.01 мас.% (2), 0.05 мас.% (3), 0,1 (4) мас.%.



(1) – 6CB

(2) – 6CB та 0.01 мас.% Cu_7PS_6

(3) – 6CB та 0.05 мас.% Cu_7PS_6

(4) – 6CB та 0,1 мас.% Cu_7PS_6

Рисунок 2.4 – Залежність дійсної компоненти ϵ' комплексної діелектричної проникності від частоти у нематичній фазі для планарно орієнтованого РК [18]

Як випливає з рисунка 2.4, для частот $f < 5 \cdot 10^2$ Гц та $f > 2 \cdot 10^5$ Гц спостерігається суттєва залежність величини ϵ' від частоти.

Низькочастотна дисперсія діелектричної проникності зумовлена приелектродними процесами. Як було показано в [34], релаксаційний процес, який спостерігається при $f < 5 \cdot 10^2$ Гц, можна пояснити на основі двошарової Максвелл-Вагнерівської поляризації. Для такого випадку одним із шарів є приелектродна ділянка, у якій для даного діапазону частот перенос заряду відбувається за рахунок коливань диполів молекул РК в межах кутів, що

відповідають флуктуаціям параметра порядку. Другим шаром є об'ємна частина зразка, де перенос заряду відбувається за рахунок переносу іонів.

Відповідно до теорії Максвел-Вагнерівської поляризації величина часу релаксації повинна бути обернено пропорційною до електропровідності РК. Тому саме особливості електропровідності рідкого кристала 6CB із Cu_7PS_6 наночастинками можуть бути визначальним фактором для різниці між діелектричними спектрами без та з наночастинками.

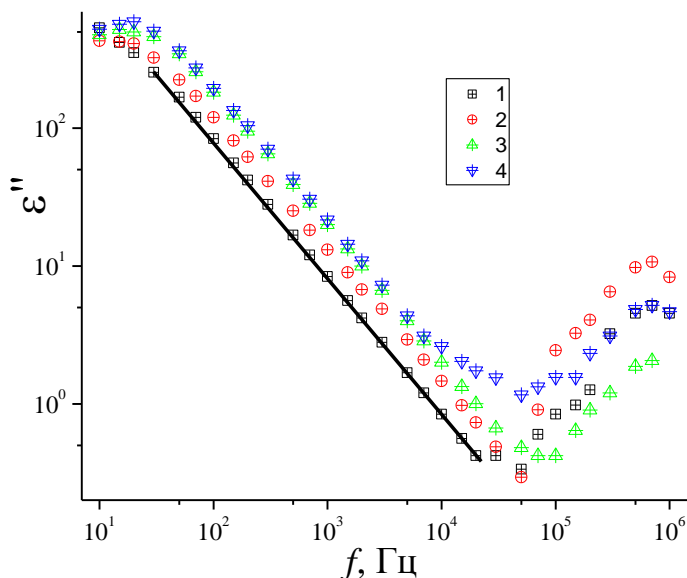
Згідно з [43] дисперсію ϵ' для $f > 2 \cdot 10^5$ Гц можна пояснити тим, що дипольні моменти молекул при цих частотах не встигають повертатись в такт зміни електричного поля. Оскільки дипольна складова поляризації молекул є основною компонентою, то це також призводить до суттєвої зміни величини ϵ' .

Із рисунка 2.4 також випливає, що в діапазоні частот $5 \cdot 10^2 < f < 2 \cdot 10^5$ Гц величина ϵ' практично не залежить від частоти. Така залежність властива зразкам, де вплив приелектродних процесів є мінімальним. Тому можна вважати, що результати, отримані в діапазоні частот $5 \cdot 10^2 < f < 2 \cdot 10^5$ Гц, характеризують об'ємні властивості зразків. До цього слід також додати, що навіть при максимальній концентрації наночастинок Cu_7PS_6 величина ϵ' для 6CB змінюється несуттєво. З цього можна зробити висновок, що діелектрична проникність наночастинок Cu_7PS_6 не є набагато більшою за діелектричну проникність 6CB.

На рисунку 2.5 наведено залежність ϵ'' планарно орієнтованого рідкого кристала 6CB (1) та 6CB з домішкою наночастинок Cu_7PS_6 з концентраціями 0.1(2), 0.5(3), 1(4) мас. %.

Як впливає із отриманих даних, спостерігається в основному обернено пропорційна залежність ϵ'' від частоти f (величина опору не залежить від частоти). В частотний діапазон, де виконується така залежність, попадає ділянка частот де, як впливає із рис.1, ϵ' не залежить від частоти. Відхилення від такої залежності для $f < 50$ Гц, як це було зроблено при

аналізі частотної залежності ϵ' , можна пояснити впливом приелектродних процесів [18].



(1) – 6CB

(2) – 6CB та 0.01 мас.% Cu_7PS_6

(3) – 6CB та 0.05 мас.% Cu_7PS_6

(4) – Cu_7PS_6 /6CB та 0,1 мас.% Cu_7PS_6

Рисунок 2.5 – Залежність уявної компоненти ϵ'' комплексної діелектричної проникності для планарно орієнтованого рідкого кристала у нематичній фазі [18]

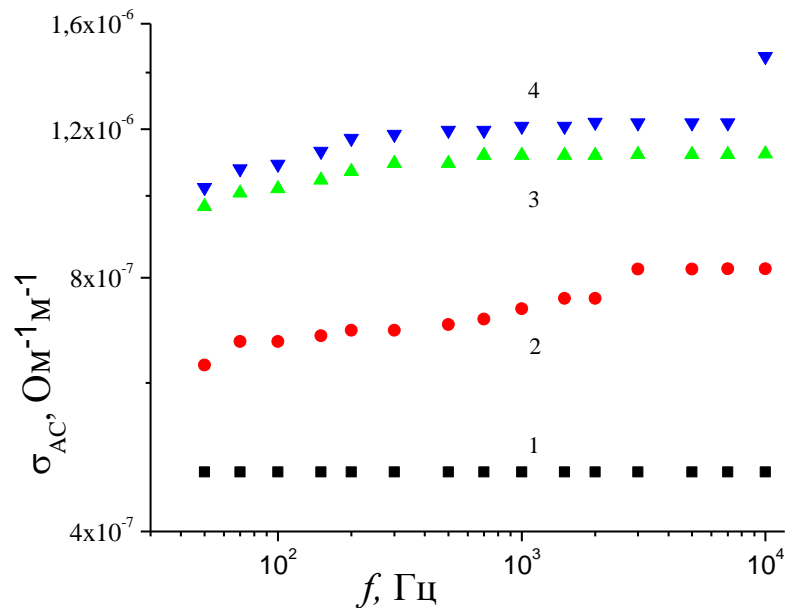
Відхилення від обернено пропорційної залежності ϵ'' від частоти f для частот більших за $2 \cdot 10^4$ Гц, як і у випадку частотної залежності ϵ' , можна пояснити суттєвим обмеженням дипольної поляризації (для таких частот дипольні моменти молекул рідкого кристала не встигають повертатись в такт зміни величини електричного поля).

Із аналізу наведених на рисунку 2.4 та рисунку 2.5 експериментальних даних, можна зробити висновок, що об'ємні властивості рідкого кристала без та з наночастинками характеризує ділянка частот $5 \cdot 10^2 < f < 2 \cdot 10^4$ Гц. Для такої ділянки часто, як було показано вище, величина ϵ' несуттєво залежить від концентрації наночастинок. Більш суттєві зміни величини ϵ'' від концентрації наночастинок на ділянці частот $5 \cdot 10^2 < f < 2 \cdot 10^4$ Гц дали підстави

для аналізу залежності величини електропровідності рідкого кристала від концентрації наночастинок.

Величина електропровідності за отриманими експериментально величинами ε'' була оцінена із співвідношення (2.5).

Як впливає з рисунка 2.6, електропровідність РК 6CB з наночастинок Cu_7PS_6 змінюється з частотою, крім чистого 6CB (1). З'ясувати основні причини такого ефекту (зміни провідності від частоти при введенні наночастинок Cu_7PS_6) в роботі [18,42] за даними, які були не можливо. Припустили, що причиною може бути внесення наночастинок додаткових носіїв заряду або перенесення ними заряду, коли вони у РК можуть ставати зарядженими, наприклад внаслідок процесів дисоціації [18,42].



(1) – 0 мас %

(2) – 0,01 мас %

(3) – 0,05 мас %

(4) – 0,1 мас %

Рисунок 2.6 – Залежності провідності планарно орієнтованого РК 6CB у нематичній фазі від частоти з наночастинок Cu_7PS_6 за різних значень концентрації [18]

З рисунку 2.6, бачимо, що при частоті $f = 10^3$ Гц провідність РК 6СВ з наночастинками Cu_7PS_6 менше залежить від частоти. Тому залежність провідності РК 6СВ від концентрації наночастинок Cu_7PS_6 розглядалась при частоті 10^3 Гц [18,42].

З рисунка 2.7 бачимо, що при концентрації від 0 мас. % до 1 мас. % наночастинок Cu_7PS_6 величина електропровідності нематичного рідкого кристала 6СВ монотонно зростає. Але зміни електропровідності при найбільших концентраціях Cu_7PS_6 прямують до насичення [3,43].

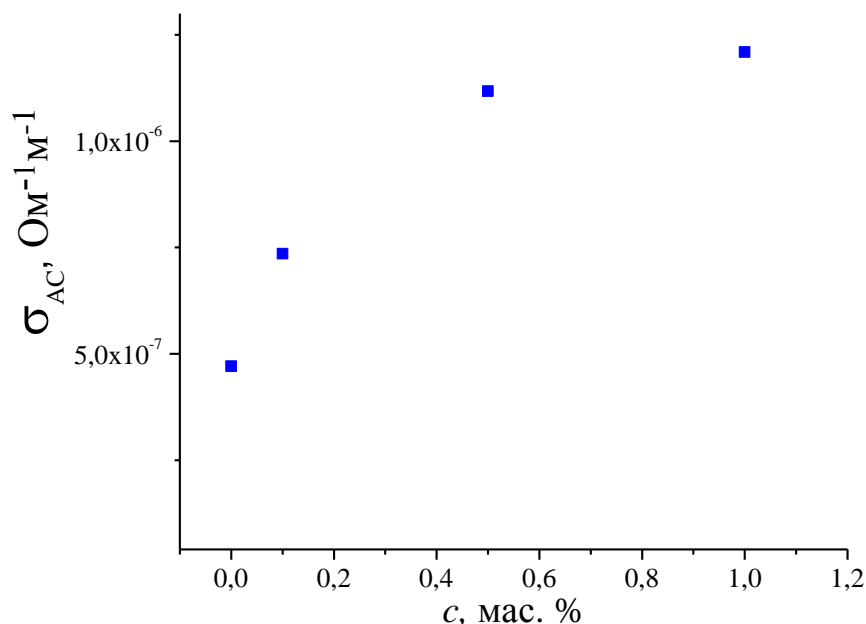


Рисунок 2.7 – Залежність провідності планарно орієнтованого 6СВ у нематичній фазі від концентрації наночастинок Cu_7PS_6 при $f = 10^3$ Гц [18,42]

Ефект насичення електропровідності НРК зустрічався при введенні діамантових наночастинок [25]. Даний ефект насичення електропровідності було пояснено:

збільшенням концентрації носіїв заряду у РК за рахунок десорбції носіїв заряду з поверхні наночастинок;

зменшення концентрації носіїв заряду у РК за рахунок їх адсорбції на поверхні наночастинок [18,42].

Важливо відмітити, що адсорбуватись на поверхні наночастинок можуть саме ті іони, які містяться у РК. Перший ефект очевидно є домінуючим при малих концентраціях наночастинок, а другий – при великих. Ефект насичення електропровідності від концентрації наночастинок можна пояснити на основі механізму, запропонованому в роботі [44].

ВИСНОВКИ ДО 2 РОЗДІЛУ

Для виконання одного із завдань дипломної роботи, а саме порівняння впливу наночастинок твердого розчину на рідкий кристал з дією наночастинок кожної компоненти твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ окремо на цей же рідкий кристал, було проведено аналіз існуючих опублікованих робіт щодо впливу суперіонних наночастинок одного типу на властивості нематичних рідких кристалів. Для планарно орієнтованого рідкого кристала 6CB із наночастинками $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ показано:

1. Низькочастотні релаксаційні процеси, які спостерігаються у рідких кристалах з невеликою похибкою можна описати дисперсією Дебая. Оцінено час релаксації та товщину приелектродної ділянки, у якій відбуваються основні зміни, що зумовлюють низькочастотну релаксацію (коливання диполів молекул під дією електричного поля в межах кутів близьких до флуктуацій параметрів порядку) [17].
2. Час релаксації становить одиниці мс і не монотонно залежить від концентрації наночастинок, а товщина приелектродної ділянки, у якій відбуваються основні явища, які зумовлюють релаксаційний процес, близька до 10 мкм і монотонно зменшується з ростом концентрації наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$.
3. Різниця між значеннями величин ε'_v для зразків 6CB+0,1 мг/мл наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ та чистим 6CB незначна. Отже, введення наночастинок до РК призводить до не великого збільшення діелектричної проникності, що може бути пов'язане зі зміною орієнтації РК, не великим значенням діелектричної проникності наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ порівняно з діелектричною проникністю РК та ймовірною агрегацією домішок та частковим осадженням домішок на поверхні електродів.
4. На відміну від РК 6CHBT з наночастинками $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ провідність РК 6CB з наночастинками $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ – монотонна функція концентрації

наночастинок. Провідність РК 6СВ з наночастинками $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ набагато перевищує провідність РК 6СНВТ при тій же концентрації наночастинок, а максимальна величина відношень цих провідностей близька до 50 при концентрації наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ рівній 0,05 мг/мл. Основною причиною таких ефектів може бути генерація додаткових у РК іонів до вже існуючих у 6СНВТ [17]. Існування додаткових іонів у 6СВ підтверджується наявністю на частотних залежностях провідності двох “полічок”, які найбільш характерно виражені при концентраціях наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ 0,05 та 0,1 мг/мл. У випадку РК 6СНВТ з домішками наночастинок зелений колір не спостерігається. А присутність зеленого кольору в 6СВ з наночастинками $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ дає підстави стверджувати, що у цьому випадку, додаткові іони це іони Cu^+ . Зроблено припущення, що причиною їх утворення Cu^+ у РК 6СВ є майже в 2 рази більший дипольний момент молекул 6СВ порівняно з молекулами 6СНВТ.

При дослідженні впливу наночастинок Cu_7PS_6 в діапазоні концентрацій 0-1 мас. % на діелектричні властивості нематичного рідкого кристала 6СВ, показано:

1. Найбільший вплив наночастинок на дійсну (ϵ') та уявну (ϵ'') компоненти комплексної діелектричної проникності спостерігається при низьких частотах (при тих частотах для яких властивості зразків зумовлені приелектродними процесами). Для частот, при яких властивості зразків зумовлені об'ємними властивостями зразків, знайдено, що при введенні наночастинок в більшій мірі збільшується величина ϵ'' , ніж ϵ' .
2. Величина електропровідності НРК 6СВ монотонно зростає зі збільшенням концентрації наночастинок Cu_7PS_6 . Для найбільших концентрацій наночастинок Cu_7PS_6 властивий ефект насичення [18].

РОЗДІЛ 3 ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НЕМАТИЧНОГО РІДКОГО КРИСТАЛА ПРИ ВВЕДЕНІ НАНОЧАСТИНОК ТВЕРДОГО РОЗЧИНУ

3.1 Методика та метод дослідження

Було використано полярний нематичний рідкий кристал, що належить до сімейства ціанобіфенілів, 4-ціано-4-н-гексилбіфеніл (6CB) (BDH Limited Poole England). Діапазон існування нематичної фази якого знаходиться в межах знаходиться від 14,5 до 29°C.

Дослідження діелектричних властивостей нематичного рідкого кристала 6CB з домішками наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ та окремо наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ і наночастинок Cu_7PS_6 проводили у комірках типу сендвіч з прозорими ІТО електродами.

3.1.1 Будова вимірювальної комірки та технологія її заповнення

Експериментальні дослідження були проведені за допомогою типових для електрооптичних досліджень РК сендвіч-структур. Як електроди переважно використовували нанесені на скляні підкладки провідні шари на основі оксидів індію In_2O_3 та олова SnO_2 . З англійської Indium tin oxide або скорочено суміш оксиду індію та олова (ІТО).

Один з електродів ІТО шарів за допомогою відповідних протравлювачів (суміш соляної кислоти та Zn) розділявся на два: зовнішній (охоронний) та внутрішній (вимірювальний). При вимірюванні охоронний електрод заземляли.

При дослідженні РК на поверхню електрода наносили орієтант. Орієнтація молекул була планорною, тобто такою, щоб довгі осі молекул були направлені в певному напрямі паралельно до площини електродів.

Як і при дослідженнях РК окремо наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ [17] та наночастинок Cu_7PS_6 [18], планарна орієнтація молекул 6CB забезпечувалась за допомогою нанесення на електроди шару поліаміду і натирання його за допомогою тканини із оксамиту в певному напрямі перед виготовленням вимірювальної комірки. Як і у [17,18], вимірювальна комірка збиралась таким чином, що напрям натирання на кожному із електродів співпадав.

Товщина вимірювальних комірок задавалась за допомогою тефлонової стрічки (прокладки). За величиною товщина вимірювальних комірок складала 10 мкм і співпадала з розмірами комірок, які використовували в дослідженнях, щодо впливу окремо наночастинок Cu_7PS_6 та наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ [17,18].

Технологія заповнення вимірювальної комірки: при температурі, яка на $5\text{-}10^\circ\text{C}$ вище температури фазового переходу нематик-ізотроп на торець сендвіч-комірки в неї як в капіляр заповнювали суміш РК з наночастинами. За допомогою капілярних сил суміш заповнювала комірку. Після заповнення комірка за допомогою клею повністю герметизувалась.

На рисунку 3.1 зображена типова схема вимірювальної комірки типу сендвіч з прозорими ІТО електродами.

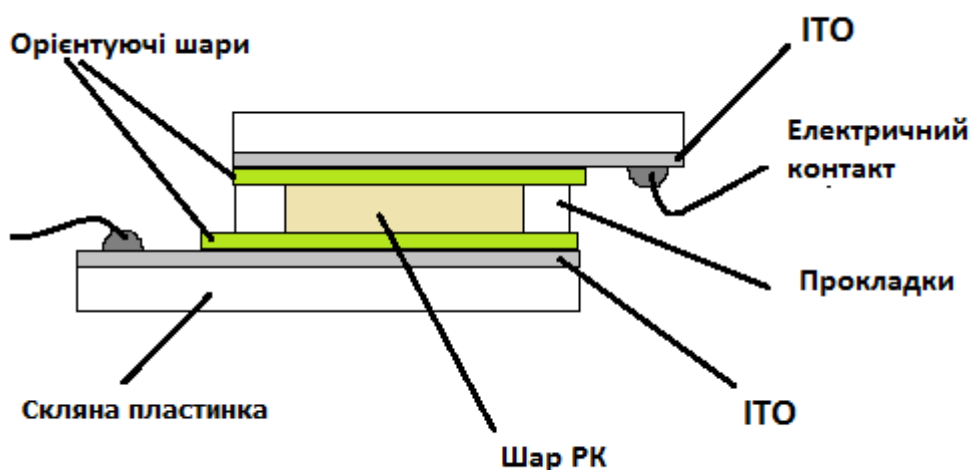


Рисунок 3.1 – Схема вимірювальної комірки

3.1.2 Технологія отримання та аналізу наночастинок

Наночастинки були отримані шляхом подрібнення монокристалів $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ за допомогою планетарного кульового млина. Фотографія млина наведена на рис. 3.2



Рисунок. 3.2 – Планетарний кульовий млин PQ-N04 [45]

Планетарний кульовий млин (PQ-N04) – лабораторне обладнання за допомогою якого можна перемішувати, подрібнювати, механічно легувати та руйнувати клітини, високотехнологічно виробляти матеріали і навіть колоїдно подрібнювати.

Використовуючи метод оцінки, на основі аналізу фотографій отриманих при спостереженні у електронному мікроскопі Tescan Vega3, визначали розміри наночастинок при напрузі 20 кВ.

Скануючий електронний мікроскоп VEGA3 - це компактний і легкий в управлінні інструмент. Найвища якість зображення, значний рівень автоматизації мікроскопа, простота у використанні і швидкість в отриманні результатів якісного елементного аналізу - головні достоїнства цього приладу.

Таблиця 3.1 – Основні характеристики електронного мікроскопу Tescan Vega3 [45]

Електронна оптика	
Роздільна здатність (в режимі високого вакуума)	3 нм при 30 кВ 2 нм при 30 кВ
Збільшення	від $2 \times$ до 1 000 000 \times
Прискорююча напруга	від 200 В до 30 кВ
Струм пучка електронів	від 1 пА (10^{-12} А) до 2 мкА ($2 \cdot 10^{-6}$ А)
Система сканування	
Швидкість сканування	від 20 нс до 10 мс на піксель (регулюється ступінчасто або безперервно)
	сканування по лінії і в точці;
Вакуумна система	
Вакуум у камері	Режим високого вакууму: $<9 \times 10^{-3}$ Па Режим зниженого вакууму: 3 - 150 Па Режим низького вакууму: 3 - 500 Па
Камера	
Внутрішній діаметр	230 мм
Ширина дверці	148 мм
Число портів	11
Столик зразків	
Переміщення	Обертання: 360° неперервно Нахил: від -80° до $+80^{\circ}$
Максимальна висота зразків	81 мм (без обертання столика) 60 мм (з обертанням столика)

На "Сонячному колесі" планетарний кульовий млин PQ-N04 має 4 вбудованих посадочних місця, що розташовані ексцентрично [45]. При обертанні "Сонячного колеса" на розмельні кульки у склянках впливають сили Коріоліса. За рахунок різниці у швидкостях між тілами, що мелються та склянкою виникає взаємодія сил тертя і удару, при цьому вивільняється висока динамічна енергія. На цифровій панелі відображається швидкість в $\frac{\text{об}}{\text{хв}}$ або частота. Спеціально влаштований таймер для контролю часу роботи (найменше - 1 хвилина, найбільше - 999 хвилин). До того ж таймер

контролює інтервали та напрямок обертання склянок. Мінімальний остаточний помел - до 0,1 мкм [45].

Для даного пристрою можливі такі методи подрібнення: в одному напрямку з таймером, в одному напрямку без урахування часу, в одному напрямку з інтервалами і таймером, у двох напрямках з таймером і паузами та у двох напрямках з таймером. Нижче у таблиці 3.3.2 наведені основні його характеристики.

Планетарний кульовий млин – ідеальний розмелювальний інструмент, для якого характерні такі властивості: висока швидкість обертання, тонкий помел, висока однорідність суміші, низький рівень шуму, надійна і безпечна експлуатація та відмінна відтворюваність для подальшого аналізу.

Нижче, на рисунку 3.3 наведено фотографію наночастинок у мікроскопі Tescan Vega3 .

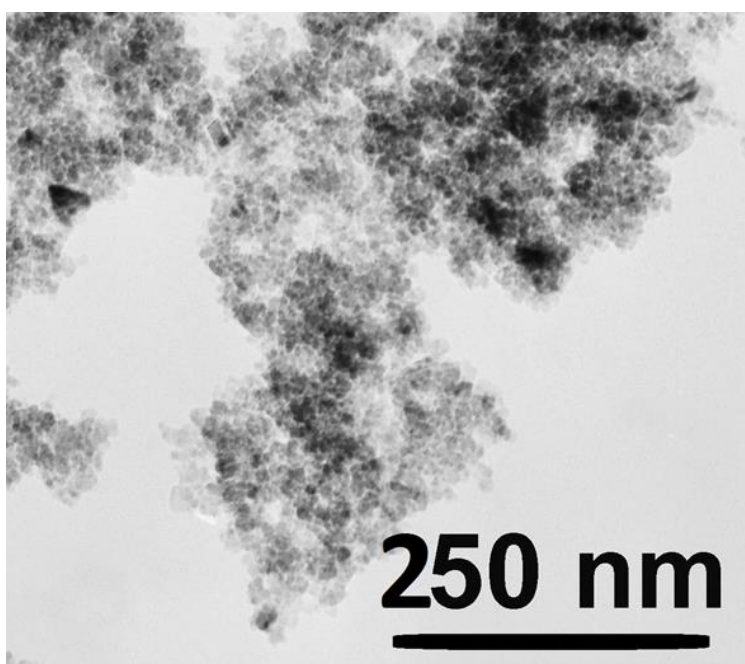


Рисунок 3.3 – Фотографія наночастинок у електронному мікроскопі

За допомогою спеціального програмного забезпечення Атлас проводилась систематизація, обробка та архівування зображень, отриманих електронним мікроскопом Tescan Vega3. На основі такої обробки фотографій

побудована гістограма Рисунок 3.4 , яка показує розподіл наночастинок по розмірах.

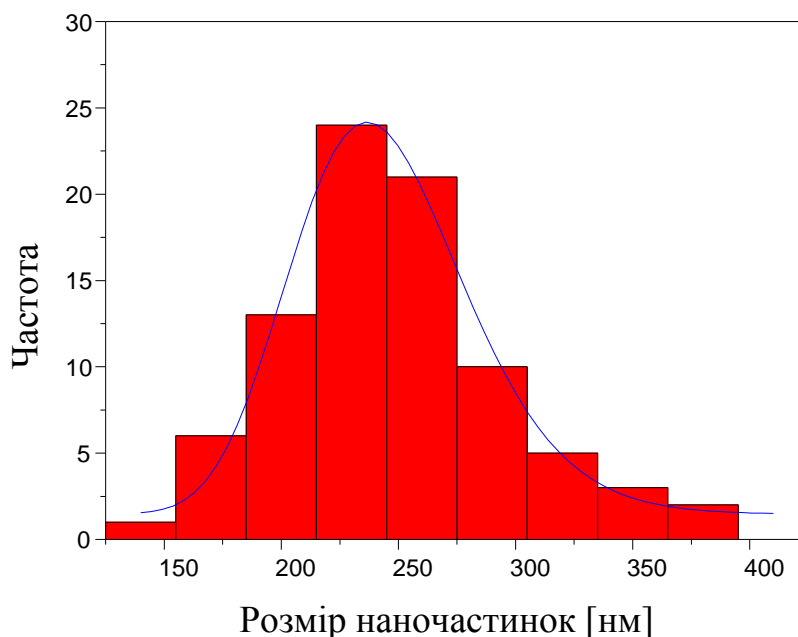


Рисунок 3.4 – Гістограма розподілу наночастинок по розмірах

Наночастинки твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ близької до сферичної форми. За гістограмою рисунок 3.4 було визначено, що діаметр частинок становить $d = 250 \pm 80$ нм.

3.1.3. Технологія змішування РК та отримання сумішей з необхідною концентрацією наночастинок

Для виготовлення сумішей РК з невеликою концентрацією наночастинок використовували метод тривалого перемішування. Для покращення процесу перемішування використовували ультразвуковий диспергатор УЗДН-А1800. Це обладнання за допомогою якого можна подрібнювати зразки і отримувати емульсії до 0,01 мкм, перемішувати (гомогенізувати) рідини, що не змішуються та об'єднувати чи розділяти інші

речовини (субстанції). Нижче у таблиці наведені основні характеристики цього приладу [46].

Таблиця 3.2 – Основні технічні характеристики ультразвукового диспергатора УЗДН-М900Т [46]

Діапазон робочих частот	20-25 кГц
Тривалість ультразвукового імпульсу	0,1-9,9 с
Введення паузи	0,1-99,9 с
Загальний час роботи	0,1-999,9 хв
Встановлення потужності	1-99 %
Встановлення температури	До 60 °С
Діаметр наконечника	20 мм або 22 мм
Потужність ультразвуку	До 1800 Вт
Робоча напруга	220 В, 50 Гц
Об'єм диспергування	50-1200 мл



Рисунок 3.5 – Фото ультразвукового диспергатора УЗДН-М900Т [46]

3.1.4 Визначення залежності опору та ємності від частоти

Проаналізувавши літературу по визначенню C та R в широкому діапазоні частот, які використовуються при дослідженні діелектричних рідин [47] або електролітів [48-51], можна зробити висновок, що простого методу для аналізу залежності C та R не існує.

Пошук необхідного для цього обладнання показав, що ті пристрої, які підходять для дослідження і зараз випускаються промисловістю, мають дуже високу вартість. Наприклад, діелектричний спектрометр Novocontrol BDS4000, країна виробник - Німеччина, має досить широкий діапазон частот (10^{-5} - 10^7 Гц [52]), але на сьогоднішній день дуже дорогий.

В результаті, нами для дослідження діелектричних властивостей було обрано осцилоскопічний метод [53]. Цей метод широко використовувався при дослідженні органічних напівпровідників [54-56].

Проведемо аналіз проходження струму через зразок за довільної форми вимірювального сигналу. Для цього виберемо певне значення напруги U_x .

Струм, що проходить через зразок, при збільшені напруги з часом може бути виражений за формулою

$$I_1 = \frac{U_x}{R} + C \frac{dU}{dt}, \quad (3.1)$$

де U_x - певне значення напруги, В;

R – опір, Ом

а при зменшені напруги з часом

$$I_2 = \frac{U_x}{R} - C \frac{dU}{dt}, \quad (3.2)$$

Для обраного певного значення U_x . додаючи значення струмів, можна отримати опір R . Аналогічно, віднімаючи значення струмів, можна отримати значення ємності C .

Для сигналу трикутної форми виконується співвідношення

$$U = 4U_0ft, \quad (3.3)$$

де U_0 - амплітудне значення напруги вимірювального сигналу, В;

f - частота сигналу, Гц;

t - час, с.

Отримаємо вирази для визначення ємності C та опору R з формул (3.1) та (3.2).

$$C = \frac{I_1 - I_2}{8U_0f} \quad (3.4)$$

$$R = 2 \frac{U_x}{I_1 + I_2} \quad (3.5)$$

де I_1 -струм, що проходить через зразок при збільшені напруги U_x ;

I_2 -струм, що проходить через зразок при зменшені напруги U_x .

Перед записом динамічної вольт-амперної характеристики (ВАХ) зразок певний час (в більшості рівний періоду вимірювального сигналу) перебував під дією змінної напруги. Враховуючи, що на зразок подавався періодичний в часі сигнал, слід було чекати, що у рівноважному стані значення струму також повинно бути періодичним. Тому тільки в тому випадку, коли ВАХ наступного періоду перекривалась з ВАХ попереднього періоду, проводився запис.

Дослідження проводилось за умов, що вказані у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Умови проведення експерименту, щодо впливу наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ на НРК 6СВ

Підготовка до експерименту	
Концентрація наночастинок	0 мас.%, 0,01 мас.%, 0,05 мас.%, 0,1 мас.%
Форма наночастинок	Близька до сферичної
Діаметр наночастинок	250 нм
Товщина зразків	10 мкм
Проведення дослідження	
Метод дослідження	осцилоскопічний
Температура	293 К
Діапазон частот	$6\text{--}10^6$ Гц
Форма вимірювального сигналу	синусоїдальна
Амплітуда сигналу	0,2 В

Динамічні ВАХ записували на екрані осцилографа С1-83, працюючого в режимі осцилоскопа. Саме від цього і пішла назва осцилоскопічного методу.

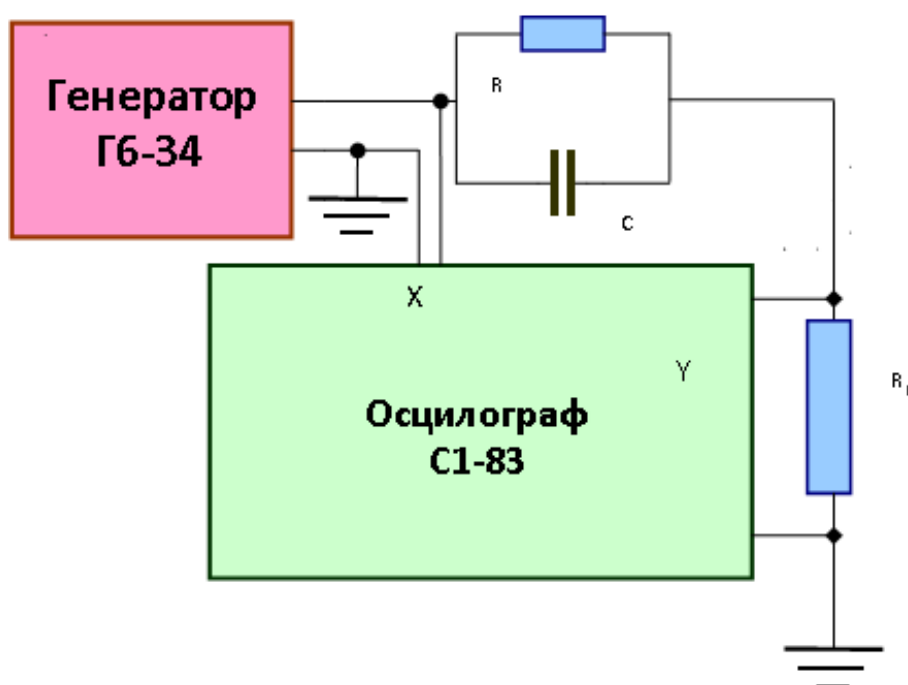


Рисунок 3.6 – Електрична схема пристроїв для вимірювання ємності C та опору R діапазоні частот $6\text{--}10^6$ Гц

Процес вимірювання C та R відбувався за таким алгоритмом:

1. На зразок подавався сигнал від генератора сигналів Г6-34. Позначенню зразка на схемі відповідає паралельно з'єднані опір та ємність.
2. Опір навантаження R_n підключався послідовно з зразком. Його значення змінювалось так, щоб спад напруги $U(R)$ на ньому становив менше ніж 1% від прикладеної напруги.
3. Вихід опору навантаження приєднували до Y координати осцилографа С1-83.
4. Безпосередньо від генератора сигналів Г6-34 подавали напругу на X -координату осцилографа.
5. Записували вольт-амперні характеристики, подаючи змінну напругу. Струм через зразок визначався за спадом напруги на опорі навантаження $U(R)$, адже вхідний опір осцилографа достатньо високий (1 МОм).
6. Для розрахунку C та R використовували співвідношення (3.4) та (3.5), замінивши струм відношенням напруги до опору навантаження R_n , отримали формули (3.6) та (3.7).

$$C = \frac{\frac{U_C}{R_n} - \frac{U_R}{R_n}}{8U_0f} \quad (3.6)$$

$$R = 2 \frac{U_x}{\frac{U_C}{R_n} + \frac{U_R}{R_n}}, \quad (3.7)$$

Основним завданням осцилоскопічного методу було визначення частотної залежності C та R . Проте при дослідженні впливу наночастинок на діелектричні властивості РК переважно аналізуються не частотні залежності C та R , а частотні залежності компонент комплексної діелектричної проникності ε' та ε'' [57-58]. З урахуванням геометричних розмірів комірок за

величинами R та C визначали відповідно уявну ε'' та дійсну ε' компоненти комплексної діелектричної проникності.

Як відомо, C та R пов'язані між собою такими співвідношеннями:

$$\varepsilon' = \frac{Cd}{\varepsilon_0 S} \quad (3.8)$$

$$\varepsilon'' = \frac{d}{2\pi\varepsilon_0 fSR} \quad (3.9)$$

де C – ємність конденсатора;

d – товщина зразка;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$ – електрична стала;

$\pi = 3,14$;

f – частота сигналу;

S – площа поперечного перерізу зразка;

R – опір зразка.

3.2 Результати експерименту

У таблицях 3.4, 3.6, 3.8 та 3.10 величина амплітуди змінної напруги синусоїдальної форми становить 0,5 В. Напруга, при якій проводились вимірювання - 0,2 В. Товщина зразка становила 10 мкм. Вимірювання проводились при кімнатній температурі - 293 К.

За даними, які наведені в таблиці 3.4 проведено розрахунки частотних залежностей дійсної ε' та уявної ε'' компонент діелектричної проникності для РК 6СВ без домішок наночастинок. Обчислені результати наведено у таблиці 3.5.

Таблиця 3.4 – Експериментальні дані щодо діелектричних властивостей чистого 6СВ.

f , Гц	R_n , кОм	$U(C)$, мВ	$U(R)$, мВ
6	31,10	3,00	3,20
10	31,10	2,60	3,40
15	31,10	2,00	3,70
20	31,10	1,65	3,75
30	31,10	1,35	3,85
50	31,10	1,15	3,90
70	31,10	1,20	3,90
100	31,10	1,40	3,90
150	31,10	1,85	3,95
200	31,10	2,30	4,00
300	31,10	3,30	4,15
500	31,10	5,40	4,30
500	10,40	1,90	1,40
700	10,40	2,60	1,40
1000	10,40	3,70	1,40
1500	10,40	5,70	1,40
1500	3,12	1,70	0,50
2000	3,12	2,30	0,50
3000	3,12	3,45	0,50
5000	3,12	5,90	0,50
5000	1,03	1,90	0,20
7000	1,03	2,75	0,20
10000	1,03	3,90	0,20
15000	1,03	5,95	0,20
15000	0,32	1,75	0,05
20000	0,32	2,35	0,05
30000	0,32	3,55	0,05
50000	0,32	6,05	0,05
50000	0,11	2,00	0,05
70000	0,11	2,75	0,05
100000	0,11	3,95	0,05
150000	0,11	6,00	0,05
150000	0,03	1,80	0,05
200000	0,03	2,30	0,05
300000	0,03	3,60	0,05
500000	0,01	1,90	0,10
700000	0,01	2,65	0,45
1000000	0,01	3,60	0,70

Таблиця 3.5 – Залежності компонент комплексної діелектричної проникності ε' та ε'' від частоти для чистого 6СВ.

f , Гц	ε'	ε''
6	240,50	1275,00
10	125,06	765,00
15	64,13	510,00
20	39,68	382,50
30	21,64	255,00
50	11,06	153,00
70	8,24	109,28
100	6,73	76,50
150	5,93	51,00
200	5,53	38,25
300	5,29	25,50
500	5,20	15,30
700	5,20	10,93
1000	5,20	7,65
1500	5,20	5,10
2000	5,20	3,82
3000	5,20	2,55
5000	5,20	1,53
7000	5,20	1,09
10000	5,20	0,76
15000	5,20	0,51
20000	5,20	0,38
30000	5,20	0,26
50000	5,20	0,15
70000	5,20	0,11
100000	5,20	0,076
150000	5,20	0,051
200000	5,20	0,038
300000	5,20	0,026
500000	5,20	0,015
700000	5,20	0,011
1000000	4,90	0,0076

За даними, які наведені в таблиці 3.6 розраховані залежності дійсної ε' та уявної ε'' компонент діелектричної проникності від частоти f для РК 6СВ з домішками, взятих з концентрацією 0,01 мас.% наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$. Обчислені результати наведено у таблиці 3.7.

Таблиця 3.6 – Експериментальні дані щодо діелектричних властивостей 6СВ
+0,01 мас.% наночастинок $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$

f , Гц	R_n , кОм	$U(C)$, мВ	$U(R)$, мВ
6	31,10	3,55	3,25
10	31,10	3,30	3,50
15	31,10	2,85	3,75
20	31,10	2,20	4,05
30	31,10	1,75	4,15
50	31,10	1,35	4,25
70	31,10	1,30	4,30
100	31,10	1,45	4,35
150	31,10	1,80	4,35
200	31,10	2,25	4,40
300	31,10	3,25	4,45
500	31,10	5,30	4,50
500	10,40	1,85	1,55
700	10,40	2,60	1,55
1000	10,40	3,70	1,55
1500	10,40	5,60	1,60
1500	3,12	1,70	0,50
2000	3,12	2,30	0,50
3000	3,12	3,40	0,50
5000	3,12	5,80	0,50
5000	1,03	1,90	0,20
7000	1,03	2,70	0,20
10000	1,03	3,80	0,20
15000	1,03	5,85	0,20
15000	0,315	1,70	0,05
20000	0,315	2,30	0,05
30000	0,315	3,45	0,05
50000	0,315	5,95	0,05
50000	0,105	1,95	0,05
70000	0,105	2,70	0,05
100000	0,105	3,85	0,05
150000	0,105	5,90	0,05
150000	0,032	1,80	0,05
200000	0,032	2,35	0,05
300000	0,032	3,60	0,05
500000	0,01	2,05	0,10
700000	0,01	2,80	0,45
1000000	0,01	3,80	0,70

Таблиця 3.7 – Залежності компонент комплексної діелектричної проникності ε' та ε'' від частоти для 6СВ+0,01 мас.% наночастинок $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$.

f , Гц	ε'	ε''
6	307,08	1333,33
10	171,27	800,00
15	98,61	533,33
20	57,09	400,00
30	30,28	266,67
50	14,01	160,00
70	9,64	114,28
100	7,53	80,00
150	6,23	53,33
200	5,84	40,00
300	5,62	26,67
500	5,50	16,00
700	5,50	11,43
1000	5,50	8,00
1500	5,50	5,33
2000	5,50	4,00
3000	5,50	2,67
5000	5,50	1,60
7000	5,50	1,14
10000	5,50	0,80
15000	5,50	0,53
20000	5,50	0,40
30000	5,50	0,27
50000	5,50	0,16
70000	5,50	0,11
100000	5,50	0,08
150000	5,50	0,053
200000	5,50	0,040
300000	5,50	0,027
500000	5,50	0,016
700000	5,37	0,011
1000000	5,10	0,008

За даними, що наведені в таблиці 3.8 проведено розрахунки залежності дійсної ε' та уявної ε'' компонент діелектричної проникності від частоти f для РК 6СВ з домішками, взятих з концентрацією 0,05 мас.% наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$. Результати у таблиці – 3.9.

Таблиця 3.8 – Експериментальні дані щодо діелектричних властивостей 6СВ +0,05 мас.% наночастинок $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$.

f , Гц	R_n , кОм	$U(C)$, мВ	$U(R)$, мВ
6	10,40	2,30	1,50
10	10,40	2,15	1,65
15	10,40	1,80	2,00
20	10,40	1,55	2,15
30	10,40	1,20	2,20
50	10,40	1,00	2,30
70	10,40	0,80	2,40
100	10,40	0,80	2,40
150	10,40	0,85	2,45
200	10,40	1,05	2,45
300	10,40	1,40	2,50
500	10,40	2,25	2,50
700	10,40	3,15	2,55
1000	10,40	4,50	2,60
1500	10,40	6,95	2,60
1500	3,12	2,10	0,80
2000	3,12	2,80	0,80
3000	3,12	4,25	0,80
5000	3,12	7,35	0,80
5000	1,03	2,40	0,25
7000	1,03	3,40	0,25
10000	1,03	4,90	0,25
15000	1,03	7,60	0,25
15000	0,315	2,25	0,05
20000	0,315	3,00	0,05
30000	0,315	4,60	0,05
50000	0,315	7,90	0,05
50000	0,105	2,55	0,05
70000	0,105	3,60	0,05
100000	0,105	5,10	0,05
150000	0,105	7,85	0,05
150000	0,032	2,30	0,05
200000	0,032	3,05	0,05
300000	0,032	4,75	0,05
500000	0,032	8,00	0,05
500000	0,01	2,80	0,20
700000	0,01	3,80	0,30
1000000	10,4	5,15	0,50

Таблиця 3.9 – Залежності компонент комплексної діелектричної проникності ε' та ε'' від частоти для 6СВ+0,05 мас.% наночастинок $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$

f , Гц	ε'	ε''
6	479,93	2314,00
10	269,18	1388,40
15	150,24	925,60
20	97,03	694,20
30	50,08	462,80
50	25,04	277,68
70	14,31	198,34
100	10,02	138,84
150	7,095	92,56
200	6,57	69,42
300	5,84	46,28
500	5,80	27,77
700	5,80	19,83
1000	5,80	13,88
1500	5,80	9,26
2000	5,80	6,94
3000	5,80	4,63
5000	5,80	2,78
7000	5,80	1,98
10000	5,80	1,39
15000	5,80	0,92
20000	5,80	0,69
30000	5,80	0,46
50000	5,80	0,28
70000	5,80	0,20
100000	5,80	0,14
150000	5,80	0,092
200000	5,80	0,069
300000	5,80	0,046
500000	5,80	0,030
700000	5,60	0,020
1000000	5,30	0,014

За даними, що наведені в таблиці 3.10 проведено розрахунки залежності дійсної ε' та уявної ε'' компонент діелектричної проникності від частоти f для РК 6СВ з домішками, взятих з концентрацією 0,1 мас.% наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$. Результати обчислень у таблиці 3.11.

Таблиця 3.10 – Експериментальні дані щодо діелектричних властивостей 6СВ
+0,1 мас.% наночастинок $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$

f , Гц	R_n , кОм	$U(C)$, мВ	$U(R)$, мВ
6	10,40	2,65	1,45
10	10,40	2,60	1,60
15	10,40	2,30	2,10
20	10,40	2,00	2,30
30	10,40	1,50	2,50
50	10,40	1,15	2,65
70	10,40	1,00	2,70
100	10,40	1,00	2,70
150	10,40	1,10	2,75
200	10,40	1,25	2,75
300	10,40	1,65	2,75
500	10,40	2,60	2,80
700	10,40	3,60	2,80
1000	10,40	5,05	2,85
1500	10,40	7,85	2,90
1500	3,12	2,35	0,90
2000	3,12	3,10	0,90
3000	3,12	4,75	0,90
5000	3,12	8,20	0,90
5000	1,03	2,65	0,25
7000	1,03	3,75	0,25
10000	1,03	5,35	0,25
15000	1,03	8,30	0,25
15000	0,315	2,40	0,05
20000	0,315	3,20	0,05
30000	0,315	4,90	0,05
50000	0,315	8,50	0,05
50000	0,105	2,65	0,05
70000	0,105	3,70	0,05
100000	0,105	5,40	0,05
150000	0,105	8,30	0,05
150000	0,032	2,40	0,05
200000	0,032	3,20	0,05
300000	0,032	4,90	0,05
500000	0,032	8,60	0,05
500000	0,01	2,60	0,10
700000	0,01	3,55	0,30
1000000	0,01	4,90	0,50

Таблиця 3.11 – Залежності компонент комплексної діелектричної проникності ε' та ε'' від частоти для 6СВ+0,1 мас.% наночастинок $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$

f , Гц	ε'	ε''
6	532,65	2580,00
10	313,56	1548,00
15	184,92	1032,00
20	120,60	774,00
30	60,30	516,00
50	27,74	309,60
70	17,23	221,14
100	12,06	154,80
150	8,84	103,20
200	7,54	77,40
300	6,63	51,60
500	6,27	30,96
700	6,20	22,11
1000	6,20	15,48
1500	6,20	10,32
2000	6,20	7,74
3000	6,20	5,16
5000	6,20	3,096
7000	6,20	2,21
10000	6,20	1,55
15000	6,20	1,03
20000	6,20	0,77
30000	6,20	0,52
50000	6,20	0,31
70000	6,20	0,22
100000	6,20	0,15
150000	6,20	0,10
200000	6,20	0,077
300000	6,20	0,052
500000	6,20	0,031
700000	6,00	0,022
1000000	5,84	0,015

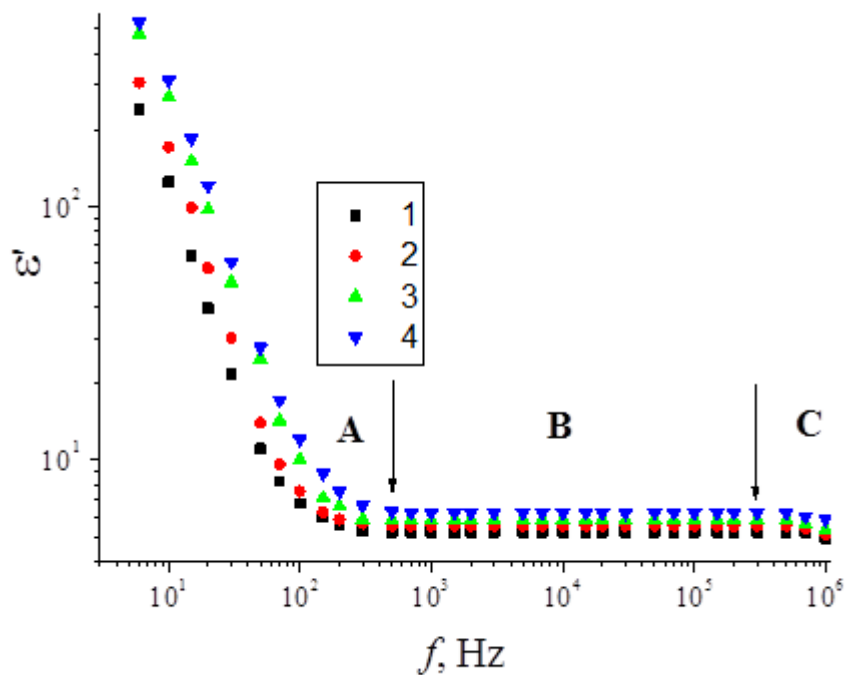
3.3 Обробка експериментальних результатів

Таблиця 3.12 – Залежності дійсної компоненти комплексної діелектричної проникності ε' від частоти планарно орієнтованого рідкого кристала 6CB з домішками наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ концентрацією: 0; 0,01; 0,05 та 0,1 мас. %.

f , Гц	ε' 6CB	ε' 6CB+0,01 мас. % $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$	ε' 6CB+0,05 мас. % $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$	ε' 6CB+0,1 мас. % $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$
6	240,50	307,08	479,93	532,65
10	125,06	171,27	269,18	313,56
15	64,13	98,61	150,24	184,92
20	39,68	57,09	97,03	120,60
30	21,65	30,28	50,08	60,30
50	11,06	14,01	25,04	27,74
70	8,25	9,64	14,31	17,23
100	6,73	7,53	10,02	12,06
150	5,93	6,23	7,09	8,84
200	5,53	5,84	6,57	7,54
300	5,29	5,62	5,84	6,63
500	5,20	5,50	5,80	6,27
700	5,20	5,50	5,80	6,20
1000	5,20	5,50	5,80	6,20
1500	5,20	5,50	5,80	6,20
2000	5,20	5,50	5,80	6,20
3000	5,20	5,50	5,80	6,20
5000	5,20	5,50	5,80	6,20
7000	5,20	5,50	5,80	6,20
10000	5,20	5,50	5,80	6,20
15000	5,20	5,50	5,80	6,20
20000	5,20	5,50	5,80	6,20
30000	5,20	5,50	5,80	6,20
50000	5,20	5,50	5,80	6,20
70000	5,20	5,50	5,80	6,20
100000	5,20	5,50	5,80	6,20
150000	5,20	5,50	5,80	6,20
200000	5,20	5,50	5,80	6,20
300000	5,20	5,50	5,80	6,20
700000	5,20	5,37	5,60	6,00
1000000	4,90	5,10	5,30	5,84

Побудова графіків проводилась за допомогою програми OriginPro 8.5.1. За даними таблиці 3.12 отримано графік (рисунок 3.7) частотної залежності дійсної компоненти комплексної діелектричної проникності ε' рідкого кристала 6CB при різних величинах концентрацій введених у РК наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$.

Із графіка на рисунка 3.7 бачимо, що всю спектральну залежність для кожної із концентрацій наночастинок можна розділити на 3 ділянки: **A**, **B** та **C**.



(1) – 0 мас %

(2) – 0,01 мас %

(3) – 0,05 мас %

(4) – 0,1 мас %

Рисунок 3.7 – Частотні залежності дійсної компоненти комплексної діелектричної проникності ε' планарно орієнтованого РК 6CB з домішками наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ за різних значень концентрацій

Дисперсія компоненти діелектричної проникності на ділянці **A** для планарної орієнтації молекул, як було показано в роботі [35], зумовлена поворотом диполів молекул РК в тонкому (десятки нанометрів)

приелектродному шарі під дією зовнішнього електричного поля. Для того щоб такий поворот диполів молекул відбувся навіть у межах кутів, які відповідають флуктуаціям параметра порядку, при частотах $f < 500$ Гц майже вся напруга прикладена до тонкого приелектродного шару. Саме завдяки перерозподілу напруги в зразку значно зростає ефективна величина ϵ' (максимальна величина ϵ' при найнижчій для проведених досліджень частоті 6 Гц, як впливає із рисунка 3.6, перевищує 100).

Цей ефект не зумовлений змінами властивостей молекул у тонкому приелектродному шарі, а перерозподілом напруги в зразку. В такому випадку для розрахунку величини ϵ' потрібно брати не всю товщину комірки, а товщину приелектродних шарів біля кожного з електродів, до яких при $f < 500$ Гц і прикладена вся напруга вимірювального сигналу.

На ділянці діелектричного спектра **B** ($500 < f < 300000$ Гц), як це впливає із аналізу рисунку 3.7, величина ϵ' не залежить від частоти., така ділянка відповідає умові, коли електричне поле є однорідним по товщині рідкого кристала [35]. Визначена на цій ділянці величина ϵ' відповідає діелектричній проникності рідкого кристала. Незначні зміни величини ϵ' при введенні наночастинок (в межах 10%) дають всі підстави стверджувати, що діелектричні властивості наночастинок не суттєво відрізняються від діелектричних властивостей рідкого кристала 6CB.

Із [59] відомо, що дисперсія ϵ' від частоти при великих f може бути зумовлена тим, що диполі молекул не будуть встигати повернутись на певний кут за час рівний $\frac{1}{4}$ періода. Такою (дипольною) дисперсією можна пояснити залежність ϵ' від частоти на ділянці діелектричного спектра **C**.

Оскільки діапазон частот, який ми вибрали для досліджень, включає тільки початок дисперсії, зумовленої дипольною поляризацією, то детально ми не будемо аналізувати вплив наночастинок на параметри дисперсії ϵ' від частоти, зумовленої дипольною поляризацією.

Таблиця 3.13 – Залежності уявної компоненти комплексної діелектричної проникності ε'' від частоти планарно орієнтованого рідкого кристала 6CB з домішками наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ концентрацією: 0; 0,01; 0,05 та 0,1 мас. %

f , Гц	ε'' 6CB	ε'' 6CB+0,01 мас. % $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$	ε'' 6CB+0,05 мас. % $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$	ε'' 6CB+0,1 мас. % $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$
6	1275,00	1333,33	2314,00	2580,00
10	765,00	800,00	1388,40	1548,00
15	510,00	533,33	925,60	1032,00
20	382,50	400,00	694,20	774,00
30	255,00	266,67	462,80	516,00
50	153,00	160,00	277,68	309,60
70	109,28	114,28	198,34	221,14
100	76,50	80,00	138,84	154,80
150	51,00	53,33	92,56	103,20
200	38,25	40,00	69,42	77,40
300	25,50	26,67	46,28	51,60
500	15,30	16,00	27,77	30,96
700	10,93	11,43	19,83	22,11
1000	7,65	8,00	13,88	15,48
1500	5,10	5,33	9,26	10,32
2000	3,82	4,00	6,94	7,74
3000	2,55	2,67	4,63	5,16
5000	1,53	1,60	2,78	3,096
7000	1,09	1,14	1,98	2,21
10000	0,76	0,80	1,39	1,55
15000	0,51	0,53	0,92	1,03
20000	0,38	0,40	0,69	0,77
30000	0,26	0,27	0,46	0,52
50000	0,15	0,16	0,28	0,31
70000	0,11	0,11	0,20	0,22
100000	0,076	0,08	0,14	0,15
150000	0,051	0,053	0,092	0,10
200000	0,038	0,040	0,069	0,077
300000	0,026	0,027	0,046	0,052
500000	0,015	0,016	0,030	0,031
700000	0,011	0,011	0,020	0,022
1000000	0,0076	0,008	0,014	0,015

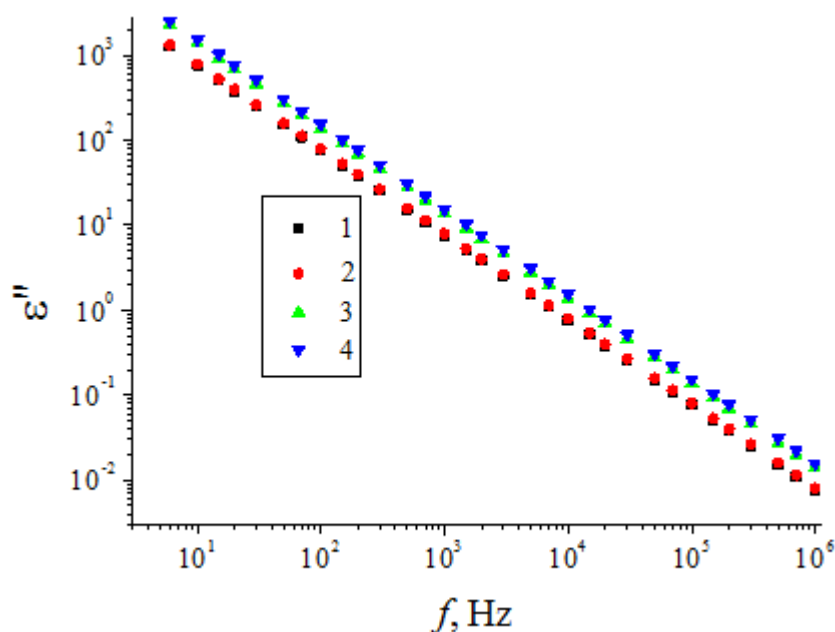
Для зручності аналізу даних, експериментальні результати щодо дослідження залежності уявної компоненти комплексної діелектричної проникності ϵ'' від частоти, планарно орієнтованого рідкого кристала 6CB, без домішок та з домішками наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ наведені окремо у таблиці 3.13.

Домішки наночастинок були взяті за концентацій: 0,01; 0,05 та 0,1 мас.%. Температура при вимірюванні була кімнатною та становила 293 К. Товщина зразків 10 нм.

На рисунку 3.8 наведені частотні залежності ϵ'' рідкого кристала 6CB при різних величинах введених у РК кожної з наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ концентрацією: 0 (1); 0,01(2); 0,05(3) та 0,1(4) мас.%.

На відміну від рисунка 3.7, як для РК 6CB без домішок (крива 1), так і для 6CB з домішками наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ з рисунка 3.8 випливає, що у всьому частотному діапазоні величина ϵ'' зменшується з ростом частоти обернено пропорційно до величини f . Така залежність відповідає умові, що величина провідності не залежить від частоти для всього частотного діапазону ($6 \cdot 10^6$ Гц). Залежність самої провідності від концентрації наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ ми проаналізуємо далі.

Після аналізу діелектричних властивостей 6CB з домішками наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$, проаналізуємо різницю між змінами діелектричних властивостей нематичного рідкого кристала 6CB при введенні у РК твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ з діями кожної наночастинки окремо, використовуючи дані робіт [17,18].



(1) – 0 мас %

(2) – 0,01 мас %

(3) – 0,05 мас %

(4) – 0,1 мас %

Рисунок 3.8 – Частотні залежності уявної компоненти комплексної діелектричної проникності ϵ'' плерно орієнтованого РК 6CB з домішками наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ за різних значень концентрацій

Для порівняння ми вибрали експериментальні результати для рідкого кристалу 6CB з максимальною концентрацією наночастинок (0,1 мас.%) із тих, які використовувались у експериментах.

У таблицях 3.14 та 3.15 наведені дані щодо залежності дійсної та уявної компоненти діелектричної проникності від частоти РК 6CB окремо з домішками наночастинок 0,1 мас.% $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ та 0,1 мас.% Cu_7PS_6 із домішками наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$. За даними цих таблиць побудовані рисунки 3.9 та 3.10.

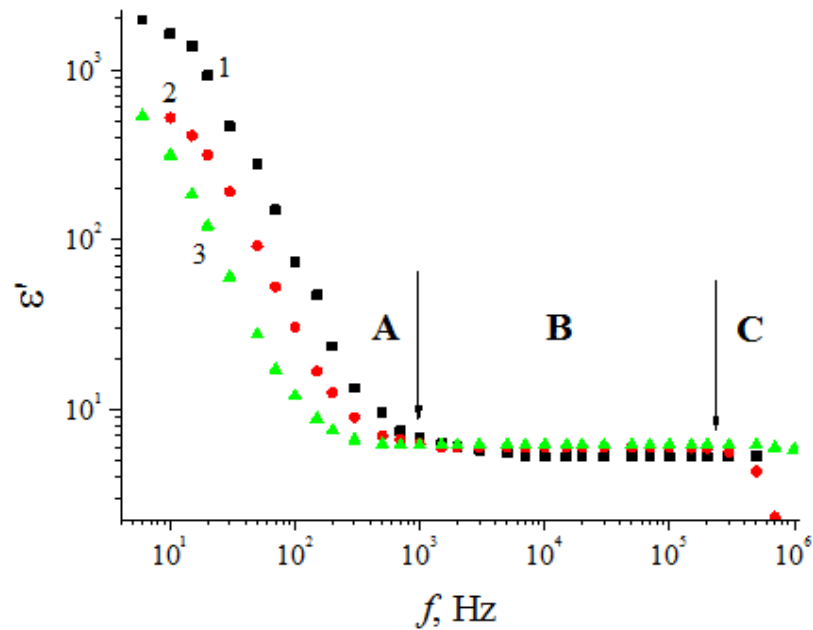
Температура при вимірюванні була кімнатною та становила 293 К. Товщина зразків 10 мкм.

Таблиця 3.14 – Частотні залежності дійсної компоненти діелектричної проникності ε' для РК 6СВ окремо з домішками наночастинок 0,1 мас.% $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ та 0,1 мас.% Cu_7PS_6 із домішками наночастинок твердого розчину 0,1 мас.% $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$

f , Гц	ε' 6СВ+0,1 мас.% $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$	ε' 6СВ+0,1 мас.% Cu_7PS_6	ε' 6СВ+0,1 мас.% $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$
6	1966,18	522,00	532,65
10	1625,38	408,00	313,56
15	1376,33	315,00	184,92
20	917,55	192,00	120,60
30	464,02	91,80	60,30
50	280,88	52,71	27,74
70	149,43	30,60	17,23
100	73,40	16,80	12,06
150	47,19	12,60	8,84
200	23,59	9,00	7,54
300	13,37	7,02	6,63
500	9,55	6,68	6,27
700	7,47	6,30	6,20
1000	6,82	6,00	6,20
1500	6,29	6,00	6,20
2000	6,00	6,00	6,20
3000	5,80	6,00	6,20
5000	5,60	6,00	6,20
7000	5,35	6,00	6,20
10000	5,33	6,00	6,20
15000	5,33	6,00	6,20
20000	5,33	6,00	6,20
30000	5,33	6,00	6,20
50000	5,33	6,00	6,20
70000	5,33	6,00	6,20
100000	5,33	5,95	6,20
150000	5,33	5,95	6,20
200000	5,33	5,64	6,20
300000	5,33	4,34	6,20
500000	5,33	2,34	6,20
700000			6,00
1000000			5,84

Таблиця 3.15 – Частотні залежності уявної компоненти діелектричної проникності ε'' для РК 6СВ окремо з домішками наночастинок 0,1 мас.% $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ та 0,1 мас.% Cu_7PS_6 і з домішками наночастинок твердого розчину 0,1 мас.% $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$.

f , Гц	ε'' 6СВ+0,1 мас.% $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$	ε'' 6СВ+0,1 мас.% Cu_7PS_6	ε'' 6СВ+0,1 мас.% $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$
6			2580,00
10	1085,40	522,17	1548,00
15	1085,40	569,64	1032,00
20	1221,08	593,38	774,00
30	1145,70	506,30	516,00
50	940,68	365,52	309,60
70	762,36	274,64	221,14
100	560,79	194,63	154,80
150	385,92	134,49	103,20
200	293,96	104,43	77,40
300	202,01	70,41	51,60
500	123,01	42,72	30,96
700	90,45	30,52	22,11
1000	63,32	21,60	15,48
1500	42,21	14,40	10,32
2000	32,56	10,92	7,74
3000	22,31	7,27	5,16
5000	14,11	4,36	3,10
7000	10,60	3,11	2,21
10000	7,73	2,61	1,55
15000	5,36	2,03	1,03
20000	4,17	1,74	0,77
30000	2,88	1,55	0,52
50000	1,73	1,16	0,31
70000	1,24	1,32	0,22
100000	0,86	1,55	0,15
150000	0,58	1,85	0,10
200000	0,43	2,33	0,077
300000	0,29	3,11	0,052
500000		4,85	0,031
700000		5,19	0,022
1000000		4,66	0,015



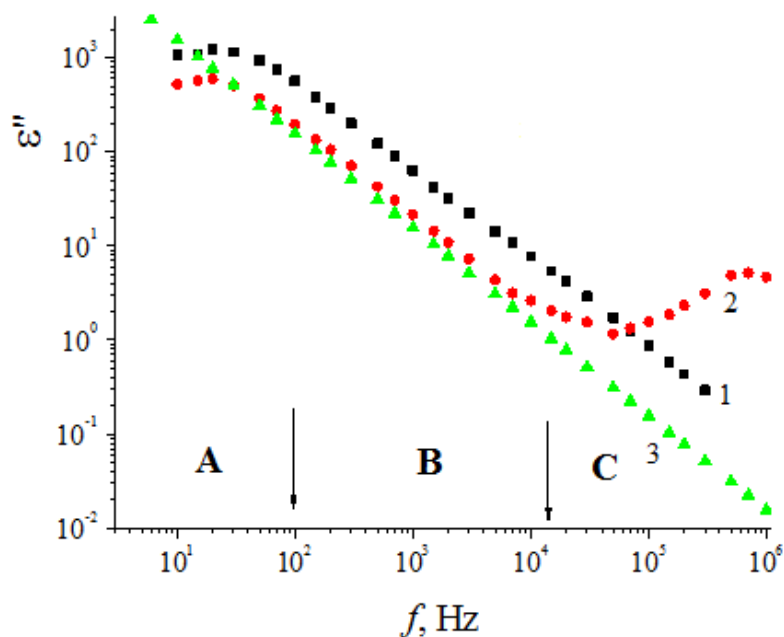
(1)– 6CB та 0,1 мас.% $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$

(2) – 6CB та 0,1 мас.% Cu_7PS_6

(3)– 6CB та 0,1 мас.% $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$

Рисунок 3.9 – Частотні залежності дійсної компоненти комплексної діелектричної проникності ϵ' планарно орієнтованого РК 6CB окремо з домішками наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$, Cu_7PS_6 та із домішками наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$

Із аналізу отриманих даних випливає, що наночастинок твердого розчину менше впливають на величину ϵ' нематичного рідкого кристала, ніж кожна з компонент окремо (рисунок 3.9). Такий же висновок можна зробити при аналізі впливу цих же наночастинок на величину ϵ'' планарно орієнтованого рідкого кристала 6CB (рисунок 3.10). Отже, вплив наночастинок $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ менший, ніж вплив кожної компоненти твердого розчину окремо.



(1) – 0,1 мас.% $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$

(2) – 0,1 мас.% Cu_7PS_6

(3) – 0,1 мас.% $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$

Рисунок 3.10 – Частотні залежності уявної компоненти комплексної діелектричної проникності ϵ'' планарно орієнтованого РК 6СВ з домішками наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$, Cu_7PS_6 та наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$

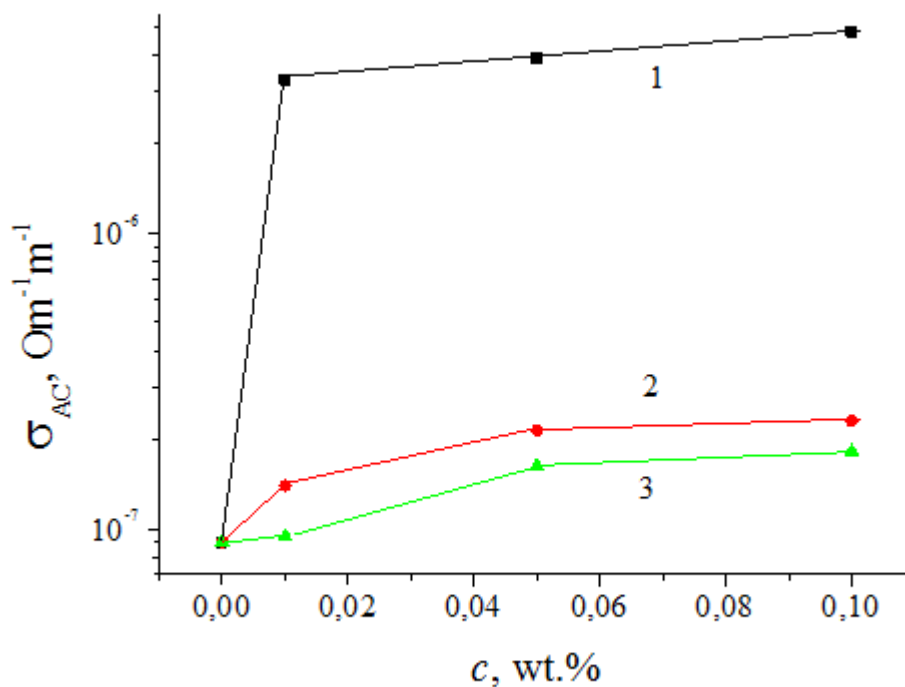
Аналіз впливу суперіонних наночастинок на властивості НРК показав [16-18], що крім того, що кожний тип наночастинок суперіонних провідників по різному впливає на електричні характеристики зразків, також спостерігаються різні залежності електричних характеристик, і зокрема електропровідності, від концентрації наночастинок. Тому логічно було порівняти концентраційні залежності електропровідності при введенні у 6СВ наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ із даними для кожної компоненти твердого розчину окремо [17,18]. Результати порівняння представлено у вигляді таблиці 3.16.

Таблиця 3.16 – Концентраційна залежність провідності на змінному струмі σ_{AC} для планарно орієнтованого 6СВ з домішками: 0; 0,1, 0,05; 0,1 мас.% Cu_6PS_5I , 0; 0,1, 0,05; 0,1 мас.% Cu_7PS_6 , 0; 0,1, 0,05; 0,1 мас.% $(Cu_6PS_5I)_{0,5}(Cu_7PS_6)_{0,5}$

Концентрація, с, мас. %	Провідність, $Om^{-1}m^{-1}$ Домішка Cu_6PS_5I	Провідність, $Om^{-1}m^{-1}$ Домішка Cu_7PS_6	Провідність, $Om^{-1}m^{-1}$ Домішка $(Cu_6PS_5I)_{0,5}(Cu_7PS_6)_{0,5}$
0	$9 \cdot 10^{-8}$	$9 \cdot 10^{-8}$	$9 \cdot 10^{-8}$
0,01	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$9,4 \cdot 10^{-8}$
0,05	$3,9 \cdot 10^{-6}$	$2,15 \cdot 10^{-7}$	$1,63 \cdot 10^{-7}$
0,1	$4,8 \cdot 10^{-6}$	$2,32 \cdot 10^{-7}$	$1,82 \cdot 10^{-7}$

Проаналізуємо залежність провідності РК 6СВ від концентрації наночастинок твердого розчину $(Cu_6PS_5I)_{0,5}(Cu_7PS_6)_{0,5}$. Для аналізу та побудови графіка обрано експериментальні результати для РК 6СВ з максимальною концентрацією наночастинок (0,1 мас.%) із тих, які використовувались у експериментах.

Як впливає з рисунка 3.11, подібно до результатів, наведених на рисунку 3.9 та рисунку 3.10, чітко видно, що у всьому діапазоні концентрацій наночастинок зміна провідності при введенні наночастинок твердого розчину $(Cu_6PS_5I)_{0,5}(Cu_7PS_6)_{0,5}$ є меншою (крива 3 на рисунку 3.11), ніж дія кожної компоненти твердого розчину Cu_6PS_5I та Cu_7PS_6 окремо (криві 1 та 2 на рисунку 3.11).



(1) – 0,1 мас.% Cu₆PS₅I

(2) – 0,1 мас.% Cu₇PS₆

(3) – 0,1 мас.% (Cu₆PS₅I)_{0,5}(Cu₇PS₆)_{0,5}

Рисунок 3.11 – Концентраційна залежність провідності на змінному струмі σ_{AC} для планарно орієнтованого 6CB з домішками наночастинок Cu₆PS₅I, Cu₇PS₆ та наночастинок твердого розчину (Cu₆PS₅I)_{0,5}(Cu₇PS₆)_{0,5}

Можна зробити припущення, що причиною такого ефекту може бути досить сильна взаємодія компонент твердого розчину між собою, внаслідок якої сумарний вплив на рідкий кристал 6CB наночастинок твердого розчину стає меншим, ніж дія кожної компоненти окремо.

ВИСНОВКИ ДО 3 РОЗДІЛУ

1. Розроблено технологію та виготовлено розчини наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ у нематичному рідкому кристалі 6CB.
2. За допомогою електронного мікроскопа визначено розподіл наночастинок $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ за розмірами.
3. Розроблена методика та виготовлено сендвіч комірки з розчинами наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ різної концентрації у планарно орієнтованому нематичному рідкому кристалі 6CB для подальшого дослідження їх діелектричних властивостей.
4. В діапазоні частот 6-10⁶ Гц при температурі 293 К досліджено вплив наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ на діелектричні властивості рідкокристала 6CB. Показано, що найбільш суттєво такі наночастинки впливають на діелектричні властивості 6CB на ділянці частот $f < 500$ Гц.
5. На основі порівняння впливу наночастинок твердого розчину $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ з впливом кожної з компонент твердого розчину окремо на діелектричні властивості рідкого кристала можна зробити висновок, що сумарна дія наночастинок твердого розчину є меншою, ніж дія кожної компоненти окремо. Зроблено припущення, що причиною такого ефекту може бути досить сильна взаємодія наночастинок між собою, внаслідок якої сумарний вплив на рідкий кристал 6CB двох наночастинок разом стає меншим, ніж дія кожної наночастинки окремо.

ВИСНОВКИ

Для реалізації поставленої мети даної роботи, яка полягала у виявленні впливу на нематичний рідкий кристал 6CB наночастинок твердого розчину суперіонних провідників $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ та у порівнянні з даними по впливу на цей же рідкий кристал окремо наночастинок $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I}$ та наночастинок Cu_7PS_6 були виконані основні завдання та отримані наступні результати:

1. Виготовлена суміш рідкого кристала 6CB з вмістом 0 мас.%; 0,01 мас.%; 0,05 мас.% та 0,1 мас.% наночастинок твердого розчину суперіонних провідників $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$.
2. Кожен тип наночастинок суперіонних провідників по різному впливає на електричні характеристики зразків. Найбільш суттєво, наночастинки, що використовувались у даній роботі, впливають на діелектричні властивості рідкого кристалу 6CB на ділянці частот $f < 500$ Гц.
3. Дослідження впливу наночастинок твердого розчину на діелектричні властивості, показали, що вони не суттєво відрізняються від діелектричних властивостей рідкого кристала 6CB. Оскільки спостерігаються незначні зміни величини ε' при введенні наночастинок (в межах 10%). До того ж величина ε'' зменшується з ростом частоти у всьому частотному діапазоні обернено пропорційно до частоти, тому провідність не залежить від частоти у всьому діапазоні частот $6\text{-}10^6$ Гц.
4. Порівнюючи вплив наночастинок твердого розчину з дією кожної компоненти окремо показали, що сумарна дія наночастинок твердого розчину є меншою, ніж дія кожної компоненти окремо. А саме, наночастинки $(\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{I})_{0,5}(\text{Cu}_7\text{PS}_6)_{0,5}$ менше впливають на компоненти комплексної діелектричної проникності. При різних значеннях концентрацій наночастинок твердого розчину зміна провідності є меншою, ніж при дії компонент цього розчину окремо.

5. На основі аналізу отриманих результатів опубліковані тези та стаття.

Отримані результати мають суттєве значення для досліджень рідких кристалів, а саме для тих, які стосуються взаємодії наночастинок та рідких кристалів. Ця тема, незважаючи на велику кількість досліджень у цій області, є широкою та цікавою для досліджень, адже на даний момент немає конкретної точки зору на процеси, що у них відбуваються.

Рідкі кристали переважно використовують у дисплейних технологіях, але їх вивчення дозволяє створювати нові пристрої відображення інформації, з'являються інші не дисплейні застосування. Їх дослідження проводяться у всіх найбільш розвинених країнах світу, зокрема й в Україні, що пояснюється можливістю широкого кола застосування у виробничих галузях діяльності.

ПЕРЕЛІК ДжЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Чандрасекар С. Жидкие кристаллы. Пер. с англ.- М.: Мир, 1980.- 344 с.
2. Прозрачные дисплеи благодаря резонансному рассеянию наночастиц [Электронный ресурс] / [В. Х. Чиа, Б. Чжэнь, В. Вэньцзюнь Цю та ін.] // Nature Communications. – 2014. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.nature.com/articles/ncomms4152>.
3. Сверхбыстрое переключение и низкое функционирование жидких кристаллов, заключенных между тонкими слоями ИТО с ионным пучком / Я. Лю, Х. Лю, С. Дэ-Шик. // Жидкие кристаллы. – 2018. – №64. – С. 1052–1059.
4. Потенциальные улучшения для дисплеев с двумя направлениями. / [Д. Матер, Л. П. Джонс, П. Гасс та ін.]. // Прикладная оптика. – 2014. – №53. – С. 769–776.
5. Исследование перестраиваемого идеального поглотителя из терагерцового метаматериала с анизотропным диэлектрическим жидким кристаллом / [М. П. Хокмабади, А. Тареки, Є. Ривера та ін.]. // AIP Advances. – 2017. – №7. – С. 015102.
6. Модуляция интенсивности режимов дефектов путем управляемого рассеяния света в фотонной структуре с жидко-кристаллическим компонентом / В. А.Гуняков, М. Н. Крахалев, В. Я. Зырянов, В. Ф. Шабанов. // Письма технической физики. – 2015. – №41. – С. 70–78.
7. Независимая от поляризации активно перестраиваемая генерация цвета на импринтированных плазмонных поверхностях / [Д. Франклин, Ю. Чен, А. Васкес-Гуардадо та ін.]. // Nature Communications. – 2015. – №6. – С. 7337.
8. Электрически перестраиваемый метаматериальный поглотитель метаматериалов с критической связью на основе нематических жидких кристаллов / [Г. Исич, Б. Васич, Д. Зографопулос та ін.]. // Physical Review Applied. – 2015. – №3. – С. 064077.

9. Химическое и биологическое зондирование с использованием жидких кристаллов / [Р. Д. Карлтон, Д. Т. Хантер, Д. С. Миллер та ін.]. // *Liquid Crystals Reviews*. – 2013. – №1. – С. 29–51.
10. Хаджихристов Г. Б. Линейный градиент размера одиночных слоев диспергированных в полимере жидких кристаллов капель микрометрового размера для дифракционной оптики / Г. Б. Хаджихристов, Й. Г. Маринов, А. В. Петров. // *Оптические Материалы*. – 2009. – №1. – С. 1578–1585.
11. Ли Г. Адаптивный объектив / Гоцян Ли. // *Прогресс в оптике*. – 2010. – №55. – С. 199–283.
12. Использование мягкой органической оптической резонансной структуры для электрооптических перестраиваемых устройств большого диапазона. / С. К. Манна, С. Ле-Галл, Л. Дюпон, Г. Ли. // *Журнал Молекулярных Жидкостей*. – 2016. – №220. – С. 161–165.
13. Курочкина М. Ю. Управление фотолюминесценцией квантовых точек CdSe / ZnS в нематическом жидком кристалле электрическим полем / М. Ю. Курочкина, Д. П. Щербин, Е. А. Коншина. // *Оптика и спектроскопия*. – 2015. – №119. – С. 812–815.
14. Щербинин Д. П. Особенности оптических и электрических свойств нематических жидких кристаллов с наночастицами : дис. канд. фіз.-мат. наук : 01.04.05 Оптика / Щербинин Д. П. – Санкт-Петербург, 2018. – 118 с.
15. Горкунов М. В. Теория среднего поля нематического жидкого кристалла, легированного анизотропными наночастицами / М. В. Горкунов, М. А. Осипов. // *Soft Matter*. – 2011. – №9. – С. 4348–4356.
16. Influence of superionic nanoparticles Cu₆PS₅I on dielectric properties of nematic liquid crystal 6CHBT / I. P. Studenyak, P. Y. Demko, A. V. Bendak, O. V. Kovalchuk. // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. – 2015. – №18. – С. 205–208.
17. Influence of Cu₆PS₆I superionic nanoparticles on the dielectric properties of 6CB liquid crystal // *Liquid Crystals* / I. P. Studenyak, V. Y. Izai, V. I. Studenyak, O. V. Kovalchuk. // *Liquid Crystals*. – 2017. – №44. – С. 897–903.

18. Saturation effect for dependence of the electrical conductivity of planar oriented nematic liquid crystal 6CB on the concentration of Cu7PS6 nanoparticles / O. V.Kovalchuk, I. P. Studenyak, V. Y. Izai, S. O. Rybak. // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2017. – №20. – С. 437–441.
19. Reinitzer F. Beiträge zur Kerniss des Cholesterins /F. Reinitzer // Monatshefte für chemie. — 1888. —Bd. 9. — S. 421–441.
20. З історії відкриття рідких кристалів / Б. Кожушко, В. Шендеровський // Вісн. НАН України. — 2011. — № 8. — С. 63-66. — Бібліогр.: 9 назв. — укр.
21. De Bougrenet De La Tonnaye J. L. Engineering liquid crystals for optimal uses in optical communication systems. // Liquid crystals. –2004. –V. 31.–No. 2.– P. 241–269.
22. Несіна Л.Р. Термооптичні та електрофізичні властивості диспергованих в полівінілацетаті рідкокристалічних холестеричних сумішей : дипломна робота. фіз.-мат. наук / Несіна Лілія Романівна – Київ, 2019. – 80 с.
23. Коншина Е. А. Основы физики жидкокристаллических систем / Е. А. Коншина. – Санкт-Петербург: Учебное пособие – СПб: СПб НИУ ИТМО, 2013. – 128 с.
24. Блинов Л.М. Электро и магнитооптика жидких кристаллов. – М. – Наука. – 1978.
25. De Bougrenet De La Tonnaye J. L. Engineering liquid crystals for optimal uses in optical communication systems. // Liquid crystals. –2004. –V. 31.–No. 2.– P. 241–269.
26. R. Basu, A. Garvey /Effects of ferroelectric nanoparticles on ion transport in a liquid crystal// Appl. Phys. Lett. –2014.-Vol. 105.- 151905.
27. O. Kurochkin, O. Buchnev, A. Iljin et al., A colloid of ferroelectric nanoparticles in a cholesteric liquid crystal // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. - 2009.- Vol.11. - 024003.
28. M. Kaczmarek, O. Buchnev, and I. Nandhakumar, Ferroelectric nanoparticles in low refractive index liquid crystals for strong electro-optic response // Appl. Phys. Lett.- 2008.-V.92.- 103307.

29. R. Basu / Soft memory in a ferroelectric nanoparticle-doped liquid crystal // Phys. Rev. E.- 2014.-Vol.89. - 022508.
30. J.-F. Blach, S. Saitzek, C. Legrand et al., BaTiO₃ ferroelectric nanoparticles dispersed in 5CB nematic liquid crystal: Synthesis and electro-optical characterization// J. Appl. Phys.- 2010.- V.107.- 074102.
31. S. N. Paul, R. Dhar, R. Verma et. al., Change in Dielectric and Electro-Optical Properties of a Nematic Material (6CHBT) Due to the Dispersion of BaTiO₃ Nanoparticles //Mol. Cryst. Liq. Cryst.- 2011.-Vol.545.- P. 105[1329]–111[1335].
32. N. Podoliak, O. Buchnev, M. Herrington et al. / Elastic constants, viscosity and response time in nematic liquid crystals doped with ferroelectric nanoparticles // RSC Adv.- 2014.-Vol.4.-P.46068–46074.
33. Вплив наночастинок Cu₆PS₅I на діелектричні властивості нематичного рідкого кристала 6CB: матеріали наукових конференцій та семінарів КНУТД/-Київ, 26 квітня, 2018. с.453-454.
34. Yaroshchuk O., Kovalchuk A., Kravchuk R., The interfacial dipole-to-dipole interaction as a factor of polar anchoring in the cells with planar liquid crystal alignment // Mol. Cryst. Liquid Cryst. 438, p. 195-204 (2005).
35. A.V. Kovalchuk / Relaxation processes and charge transport across liquid crystal - electrode interface // J. Phys.: Condensed Matter. – 2001.- V.13.- 24.- P. 10333-10345.
36. Т.Л. Челидзе, А.И. Деревянко, О.Д. Куриленко Электрическая спектроскопия гетерогенных систем. Киев: Наукова думка, 1977. 232 с
37. Шаульська М. О. Особливості зміни електричних властивостей нематичного рідкого кристалу при введенні суперіонних наночастинок [Електронний ресурс] / М. О. Шаульська, О. В. Ковальчук // Наукові розробки молоді на сучасному етапі : тези доповідей XVI Всеукраїнської наукової конференції молодих вчених та студентів (27-28 квітня 2017 р., Київ). – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://er.knutd.edu.ua/handle/123456789/8606>.

38. Verma R., Mishra M., Dhar R., Dabrowski R. Single walled carbon nanotubes persuaded optimization of the display parameters of a room temperature liquid crystal 4-pentyl-4'cyanobiphenyl. *Journal of Molecular Liquids* 221 (2016) p.190–196.
39. Mishra M., Kumar S. and Dhar R. Effect of dispersed colloidal gold nanoparticles on the electrical properties of a columnar discotic liquid crystal. *RSC Adv.*, 2014, 4, 62404–62412.
40. W.F. Kuhs, R. Nitsche, K. Scheunemann, Vapour growth and lattice data of new compounds with icosahedral structure of the type $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{Hal}$ (Hal = Cl, Br, I) // *Mater.Res. Bull.* 11, p. 1115-1124 (1976).
41. R.B. Beeken, J.J. Garbe, N.R. Petersen, Cation mobility in the $\text{Cu}_6\text{PS}_5\text{X}$ (X = Cl, Br, I) argyrodites // *J. Phys. Chem. Solids*, 64, p. 1261-1264 (2003).
42. Зміни електричних властивостей нематичного рідкого кристала 6CB під дією наночастинок Cu_7PS_6 : : матеріали наукових конференцій та семінарів КНУТД/ -Київ, 26 квітня, 2018. с.455-456.
43. Haase W., Wrobel S., *Relaxation Phenomena: Liquid Crystals, Magnetic Systems, Polymers, High-Tc*, Springer, 2003, 359 p
44. S. Tomylo, O. Yaroshchuk, O. Kovalchuk, U. Maschke, and R. Yamaguchi, Dielectric and Electro-Optical Properties of Liquid Crystals Doped with Diamond Nanoparticles//*Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 541, p. 35[273]–43[281](2011).
45. Ужгородський національний університет [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Центр колективного користування науковим обладнанням «Лабораторія експериментальної та прикладної фізики».-Ужгород, УжНУ,2018-2020.–Режим доступу: https://www.uzhnu.edu.ua/uk/cat/deps-center_coll_use/equipment (дата звернення - 18.03.2020) - Назва з екрану.
46. Тысячник И. Ультразвуковой пьезострикционный диспергатор УЗДН-М [Електронний ресурс] / Игорь Тысячник // *Flagma*. – 2019. – Режим доступу до ресурсу:<https://sumy.flagma.ua/ultrazvukovoy-pezostrikcionny-dispergator-o3482159.html>.

47. Ахадов Я.Ю. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. -М.: Изд. стандартов, 1972.-412 с.
48. Усиков С.В. Электрометрия жидкостей.- Л.: Химия, 1974.- 144 с.
49. Графов Б.М., Укше Е.А. Электрохимические цепи переменного тока.- М.: Наука, 1973.-128 с.
50. Методы измерения в электрохимии /Под ред. Э. Егера и А. Залкинда. Пер.с англ.- М.: Мир, 1977.- Т.1.- 585 с.
51. Методы измерения в электрохимии /Под ред. Э. Егера и А. Залкинда. Пер.с англ.- М.: Мир, 1977.-Т.2. - 475 с.
52. Dielectric Newsteller.-1996.-N 5.- P.1-8.
53. A.J. Twarowski, A.C. Albrecht/ Depletion layer in organic films: Low frequency measurements in polycrystalline tetracene//J. Chem. Phys.- 1979.- Vol.20.-P. 2255-2261.
54. Chamberlain C.A. Depletion layer characteristics and photovoltaic energy conversion in organic *p-n* heterojunction // Solar Cells.- 1982.- V.10, N 2.- P.199-210.
55. Hamann C., Kovalchuk A.V., Kurik M.V. Effect of crystal structure on properties of a Schottky barrier type with Ni/PbPc // Materials Science.-1984.- V.10, N 1-2.- P.109-112
56. Ковальчук А.В. Влияние последовательного сопротивления на вольт-емкостную характеристику барьерных структур металл - органический полупроводник - металл // ФТП.- 1985.-Т.19, №2.- С.307-310.
57. Духин С.С., Шилов В.Н. Диэлектрические явления и двойной электрический слой в дисперсных системах и полиэлектролитах.- Киев: Наукова думка, 1972, с.208.
58. Челидзе Т.Л., Деревянко А.И., Куриленко О.Д. Электрическая спектроскопия гетерогенных систем. - Киев: Наукова думка, 1977, с 231.
59. E.Barsukov, J.R. Macdonald /Impedance Spectroscopy. Theory, Experiment and Applications. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.- 2005.- 595.